

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

تعیین موقعیت مبتنی بر میدان مغناطیسی زمین با استفاده از شبکه‌های عصبی

نگارنده : سعید پروری یامچی

استاد راهنما :

دکتر علی اکبرزاده کلات

استاد مشاور:

مهندس کاوه کیانفر

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی برق و رباتیک

گروه : کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانمسعید پروری یامچی.....
تعیین موقعیت مبتنی بر میدان مغناطیسی زمین با استفاده از شبکه‌های عصبی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به:

آن صنوبرهای سرخی که

خون لاله زاده شدند

و خون شقایق ایستاده مردند...

به آنان که سرخی فلق از خونشان است و نوید طلوع خورشید را می‌دهد...

تشکر و قدردانی:

پاس خدایی را که مرا هستی بخشد و به تفکر آراست.

مشکر می‌نایم از:

اساتید بزرگوارم آقایان دکتر علی اکبرزاده کلمات و مهندس کاوه کیانفر که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمودند و همواره راه‌ها و راه‌گشای نگارنده در اتمام و اكمال پایان نامه بودند.

پدرم، آنکه حالمان به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه‌نایم.

مادرم، آنکه آفتاب مهرش در آستانه قلبم، همچنان پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد.

همسرم، آغاز فصل سبز زندگی ام، پایان تمام جستجوهایم، او که وجودش شادی، بخش و صفایش مایه آرامش من است.

برادر و خواهرم، بمنفران مهربان زندگیم که باهم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم.

قلبم لبریز از عشق به شماست و خوشبختی‌تان منتهای آرزویم.

تعهد نامه

اینجانبسعید پرووری یامچی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشتهمهندسی برق گرایش کنترل..... دانشکدهمهندسی برق و رباتیک..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین موقعیت مبتنی بر میدان مغناطیسی زمین با استفاده از شبکه‌های عصبی..... تحت راهنمایی.....دکتر علی اکبرزاده کلات.....متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان نامه هدف تعیین موقعیت برون خط یک جسم متحرک روی سطح زمین با استفاده از مؤلفه های میدان مغناطیسی زمین است. بدین منظور با استفاده از مدل WMM2015 میدان مغناطیسی زمین، داده های میدان مغناطیسی زمین تولید شده و پس از ایجاد یک مدل شبکه عصبی پرسپترون دو لایه از روند تغییرات میدان مغناطیسی زمین و تنظیم پارامترهای آن با استفاده از روش آموزش پس انتشار خطای با سرپرست و استفاده از دو الگوریتم متفاوت گرادیان نزولی و روش آموزش مختلط یک سیستم تعیین موقعیت ایجاد شده است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که سرعت همگرایی پارامترهای قابل تنظیم شبکه به سمت مقادیر بهینه در روش آموزش مختلط نسبت به الگوریتم گرادیان نزولی بیشتر است. سیستم تعیین موقعیت ایجاد شده با استفاده از مدل سازی پرسپترون چند لایه از دقت و مقاومت مناسبی برخوردار است و می تواند موقعیت را با دقتی در حدود ۱۰۰ متر متوسط تعیین کند.

کلمات کلیدی: شبکه عصبی، میدان مغناطیسی زمین، تعیین موقعیت، گرادیان نزولی، آموزش مختلط

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه‌ای بر ناوبری
۳	۱-۲- دسته‌بندی کلی ناوبری
۳	۱-۲-۱- ناوبری کور- مانند سیستم ناوبری اینرسی
۵	۱-۲-۲- ناوبری خارجی وابسته- مانند GPS
۶	۱-۲-۳- ناوبری الگومحور- مانند ناوبری بر اساس شناسایی عوارض زمین
۷	۱-۳- ناوبری مغناطیسی
۸	۱-۳-۱- میدان مغناطیسی زمین
۹	۱-۳-۲- سنسورهای مغناطیسی
۱۰	۱-۳-۳- منابع خطای داده‌های اندازه‌گیری شده
۱۲	۱-۳-۳-۱- روش‌های کالیبراسیون
۱۳	۱-۳-۴- الگوریتم‌های ناوبری مغناطیسی
۱۶	۱-۴- تعریف مسئله
۱۷	۱-۵- ساختار پایان‌نامه
۱۹	فصل ۲: میدان مغناطیسی زمین
۲۰	۱-۲- مقدمه
۲۰	۲-۲- میدان ژئومغناطیس
۲۱	۱-۲-۲- ماهیت میدان ژئومغناطیس
۲۲	۲-۲-۲- مولفه‌های میدان ژئومغناطیس
۲۵	۲-۳- مدل ژئومغناطیس
۲۵	۱-۳-۲- مدل ریاضی میدان ژئومغناطیس
۲۸	۲-۳-۲- مدل WMM2015
۴۱	فصل ۳: روش پیشنهادی جهت تعیین موقعیت
۴۲	۱-۳- مقدمه
۴۲	۲-۳- مدل‌سازی عصبی
۴۴	۳-۳- ساختار شبکه عصبی پرسپترون
۴۶	۴-۳- تعیین ساختار شبکه
۴۶	۱-۴-۳- الگوریتم تعیین ساختار
۴۸	۵-۳- تنظیم پارامترهای شبکه
۴۹	۱-۵-۳- الگوریتم گرادینان نزولی
۵۴	۲-۵-۳- روش آموزش مختلط

فصل ۴: پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

۵۷

- ۴-۱- مقدمه ۵۸
- ۴-۲- معیار بررسی عملکرد سیستم ۵۹
- ۴-۳- نتایج سیستم تعیین موقعیت مبتنی بر مدل‌سازی عصبی ۶۰
- ۴-۳-۱- توصیف منطقه آزمون ۶۱
- ۴-۳-۲- مدل‌سازی ۶۱

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷۷

- ۵-۱- نتیجه‌گیری ۷۸
- ۵-۲- پیشنهادات ۷۸

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) ناوبری کلاسیک با استفاده از قطب‌نما و نقشه ۲
- شکل (۲-۱) روش ناوبری کور ۳
- شکل (۳-۱) سیستم ناوبری اینرسی ۴
- شکل (۴-۱) روش خارجی وابسته ۵
- شکل (۵-۱) تعیین موقعیت و زمان توسط یک گیرنده GPS ۵
- شکل (۶-۱) روش الگومحور ۶
- شکل (۷-۱) ناوبری بر اساس شناسایی عوارض زمین ۷
- شکل (۸-۱) مثالی از میدان مغناطیسی زمین، دانشمندان معتقدند چرخش زمین و هسته بیرونی مایع منبع دو قطبی میدان مغناطیسی زمین است ۸
- شکل (۹-۱) مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین ۱۴
- شکل (۱۰-۱) فرایند تطبیق مغناطیسی ۱۵
- شکل (۱۱-۱) دیاگرام اساسی فیلتر کردن مغناطیسی ۱۶
- شکل (۱-۲) دو قطبی مغناطیسی زمین ۲۱
- شکل (۲-۲) بخش‌های مختلف تاثیر گذار در میدان مغناطیسی زمین ۲۲
- شکل (۳-۲) مولفه‌های میدان ژئومغناطیس ۲۲
- شکل (۴-۲) نقشه مولفه X میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست ۳۰
- شکل (۵-۲) نقشه مولفه Y میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست ۳۰
- شکل (۶-۲) نقشه مولفه Z میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست ۳۱
- شکل (۷-۲) نقشه مولفه H میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست ۳۱
- شکل (۸-۲) نقشه مولفه Declination میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست ۳۲
- شکل (۹-۲) نقشه مولفه Inclination میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست ۳۲
- شکل (۱۰-۲) نقشه مولفه F میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست ۳۳
- شکل (۱۱-۲) مسیر شماره یک حرکت با شناور روی دریا توسط یک گیرنده GPS ۳۴
- شکل (۱۲-۲) تغییرات مولفه مستقل X میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره یک ۳۵
- شکل (۱۳-۲) تغییرات مولفه مستقل Y میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره یک ۳۵
- شکل (۱۴-۲) تغییرات مولفه مستقل Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره یک ۳۶
- شکل (۱۵-۲) مسیر شماره دو حرکت با شناور روی دریا توسط یک گیرنده GPS ۳۶
- شکل (۱۶-۲) تغییرات مولفه مستقل X میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره دو ۳۷
- شکل (۱۷-۲) تغییرات مولفه مستقل Y میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره دو ۳۷
- شکل (۱۸-۲) تغییرات مولفه مستقل Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره دو ۳۸

- شکل (۱۹-۲) مسیر دایره‌ای شکل حرکت با شناور روی دریا توسط یک گیرنده GPS..... ۳۸
- شکل (۲۰-۲) تغییرات مولفه مستقل X میدان مغناطیسی زمین در مسیر دایره‌ای شکل..... ۳۹
- شکل (۲۱-۲) تغییرات مولفه مستقل Y میدان مغناطیسی زمین در مسیر دایره‌ای شکل..... ۳۹
- شکل (۲۲-۲) تغییرات مولفه مستقل Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر دایره‌ای شکل..... ۴۰
- شکل (۱-۳) مدل‌سازی عصبی..... ۴۴
- شکل (۲-۳) ساختار یک شبکه عصبی از نوع پرسپترون..... ۴۵
- شکل (۳-۳) بلوک دیاگرام الگوریتم تعیین ساختار شبکه عصبی پرسپترون..... ۴۷
- شکل (۴-۳) شبکه عصبی از نوع پرسپترون با یک لایه مخفی و یک نرون خروجی..... ۴۸
- شکل (۵-۳) بلوک دیاگرام نرون B..... ۴۹
- شکل (۶-۳) به منظور کمینه‌سازی E^2 ، قانون دلتا جهت تغییر وزن مورد نیاز را فراهم می‌کند..... ۵۰
- شکل (۷-۳) تابع خطی - تابع فعال‌ساز لایه خروجی..... ۵۲
- شکل (۸-۳) تابع \tanh - تابع فعال‌ساز لایه مخفی..... ۵۳
- شکل (۱-۴) سیستم تعیین موقعیت مغناطیسی..... ۵۸
- شکل (۲-۴) مولفه X میدان مغناطیسی زمین مغناطیسی..... ۵۹
- شکل (۳-۴) مولفه Y میدان مغناطیسی زمین مغناطیسی..... ۵۹
- شکل (۴-۴) مولفه Z میدان مغناطیسی زمین مغناطیسی..... ۵۹
- شکل (۵-۴) مسیر شماره یک..... ۶۱
- شکل (۶-۴) مسیر شماره دو..... ۶۱
- شکل (۷-۴) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای عرض جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۲
- شکل (۸-۴) خطای آموزش به ازای هر الگو برای عرض جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۳
- شکل (۹-۴) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای عرض جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۳
- شکل (۱۰-۴) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای طول جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۴
- شکل (۱۱-۴) خطای آموزش به ازای هر الگو برای طول جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۵
- شکل (۱۲-۴) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای طول جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۵
- شکل (۱۳-۴) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۶
- شکل (۱۴-۴) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۶
- شکل (۱۵-۴) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۷

- شکل (۴-۱۶) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر دایره‌ای با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی..... ۶۷
- شکل (۴-۱۷) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی ۶۸
- شکل (۴-۱۸) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای عرض جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط ۶۹
- شکل (۴-۱۹) خطای آموزش به ازای هر الگو برای عرض جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط..... ۶۹
- شکل (۴-۲۰) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای عرض جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط..... ۷۰
- شکل (۴-۲۱) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای طول جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط ۷۱
- شکل (۴-۲۲) خطای آموزش به ازای هر الگو برای طول جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط..... ۷۱
- شکل (۴-۲۳) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای طول جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط ۷۲
- شکل (۴-۲۴) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از روش آموزش مختلط..... ۷۲
- شکل (۴-۲۵) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از روش آموزش مختلط..... ۷۳
- شکل (۴-۲۶) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از روش آموزش مختلط..... ۷۴
- شکل (۴-۲۷) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر دایره‌ای با استفاده از روش آموزش مختلط..... ۷۴
- شکل (۴-۲۸) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از روش آموزش مختلط ۷۵

فهرست جداول

جدول (۱-۲) دامنه المان‌های مغناطیسی در سطح زمین..... ۲۴

فصل ١:

مقدمه

۱-۱- مقدمه‌ای بر ناوبری

مردمان ماقبل تاریخ مدام سعی می‌کردند یک روش قابل اطمینان پیدا کنند که به آنها بگوید کجا هستند. آنها را به جایی که می‌روند راهنمایی کرده و سپس به مبدا بازگرداند. مردمان غارنشین وقتی که برای تهیه غذا به شکار می‌رفتند، احتمالاً از سنگ‌ها و شاخه‌های کوچک برای علامت‌گذاری مسیر خود استفاده می‌کردند. ملوانان نیز سواحل را به دقت دنبال می‌کردند تا از گم شدنشان جلوگیری کنند. وقتی دریانوردان اولیه در اقیانوس‌ها کشتیرانی می‌کردند، دریافتند که می‌توانند مسیر خود را با دنبال کردن ستاره‌ها ترسیم کنند. فنیقی‌های^۱ باستان از ستاره شمالی برای سفر به مصر و جزیره کرت^۲ استفاده می‌کردند. پیشرفت مهم بعدی در امر ناوبری^۳ کشف قطب‌نمای مغناطیسی و دستگاه زاویه‌یاب بود. عقربه قطب‌نما همیشه نقطه شمالی را نمایش می‌دهد، بنابراین همیشه جهت مسیر حرکت را ممکن می‌کند. با کشف آهن‌ربا، ناوبری از طریق قطب‌نمای مغناطیسی آغاز شد و پس از طی مراحل زمانی و بالا رفتن سرعت و سقف پرواز و تعداد چشمگیر پروازها و ضرورت توجه شدید به مسائل ایمنی آسمان، دستگاه‌ها و وسایل پیچیده و دقیق ناوبری الکترونیکی متولد شدند. شکل (۱-۱) یک روش ناوبری کلاسیک را با استفاده از نقشه و قطب‌نما نشان می‌دهد. مسیریابی و تعیین موقعیت مکانی دو موضوع مهم و تعیین‌کننده در اکثر فعالیت‌های بشر بوده و هست و همواره انسان را در دستیابی به توانایی هر چه بیشتر و بهتر در این دو مقوله به چالش انداخته است.



شکل (۱-۱) ناوبری کلاسیک با استفاده از قطب‌نما و نقشه [۱]

1 Phoenicians

2 Crete

3 Navigation

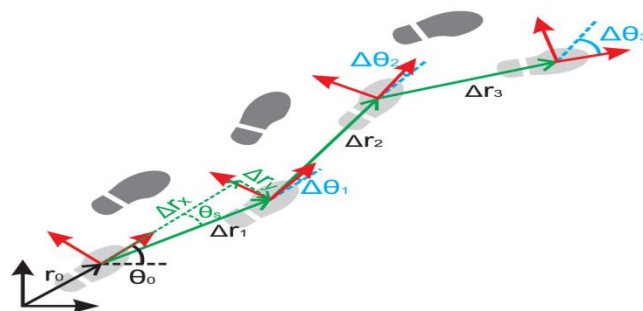
منظور از ناوبری یک وسیله، تعیین موقعیت و وضعیت آن نسبت به یک مرجع مناسب می‌باشد، یا به بیان دیگر ناوبری علمی است که به وسیله آن می‌توان وسیله را از محلی به نام مبدا به محلی دیگری به نام مقصد هدایت نمود، به نحوی که ناوبر در هر زمان که نیاز باشد موقعیت و وضعیت خود را مشخص و در صورت نیاز گزارش نماید [۱]. کلمه «Navigation» از دو کلمه لاتین به معنی کشتی و حرکت گرفته شده است و اساساً به معنی پیدا نمودن مسیر در دریا می‌باشد. اما بعدها با شروع مسافرت در فضا و خشکی این کلمه به مفهوم مسیریابی در هوا، خشکی و دریا بکار برده شد. مسیریابی اولیه توسط اجرام سماوی و قطب‌نماهای مغناطیسی انجام می‌گردیده است.

۱-۲- دسته بندی کلی ناوبری

امروزه سنسورها و سیستم‌های ناوبری به لحاظ تقسیم‌بندی گسترده و روش‌های کلی آن به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱-۲-۱- ناوبری کور - مانند سیستم ناوبری اینرسی

تصور کنید که بصورت چشم بسته در حال حرکت به برخی از مناطق ناشناخته هستید. اگر شما در حال حرکت، مسیر حرکت خود را از روی چرخش‌ها و مسیر انجام شده طی نمایید سیستم ناوبری کور است. شکل (۱-۲) روش ناوبری کور با استفاده از میزان جابجایی و اندازه چرخش‌ها را نشان می‌دهد.

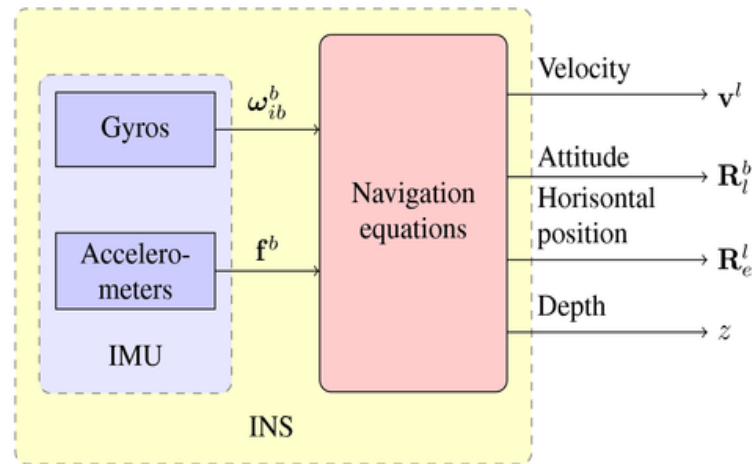


شکل (۱-۲) روش ناوبری کور

مهم‌ترین و پرکاربردترین سیستم ناوبری، در کاربردهای نظامی، سیستم ناوبری اینرسی^۱ است. در یک سیستم ناوبری اینرسی از حسگرهای اینرسی (شامل شتاب‌سنج‌ها وژیروسکوپ‌ها) برای اندازه‌گیری شتاب‌ها و سرعت‌های زاویه‌ای پرنده نسبت به فضای اینرسی استفاده می‌شود. به مجموعه

¹ Inertial Navigation System(INS)

شتاب‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌ها واحد اندازه‌گیری اینرسی^۱ گفته می‌شود. اطلاعات خروجی از IMU وارد کامپیوتر سیستم ناوبری شده و در آنجا با انجام محاسبات ناوبری، سرعت، موقعیت و وضعیت وسیله پرنده نسبت به دستگاه مرجع در هر لحظه از پرواز محاسبه می‌شود. شکل (۳-۱) بلوک دیاگرام یک سیستم ناوبری اینرسی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱) سیستم ناوبری اینرسی

ناوبری اینرسی دارای مزایایی است که آن را از سایر سیستم‌های ناوبری متمایز می‌کند که عبارتند از:

- بی‌نیاز بودن از تجهیزات زمینی
- عدم تاثیرپذیری از عوامل خارجی همچون اختلالات رادیویی و رادار
- عدم سهولت شناسایی به دلیل عدم ارسال سیگنال
- امکان استفاده در همه شرایط آب و هوایی

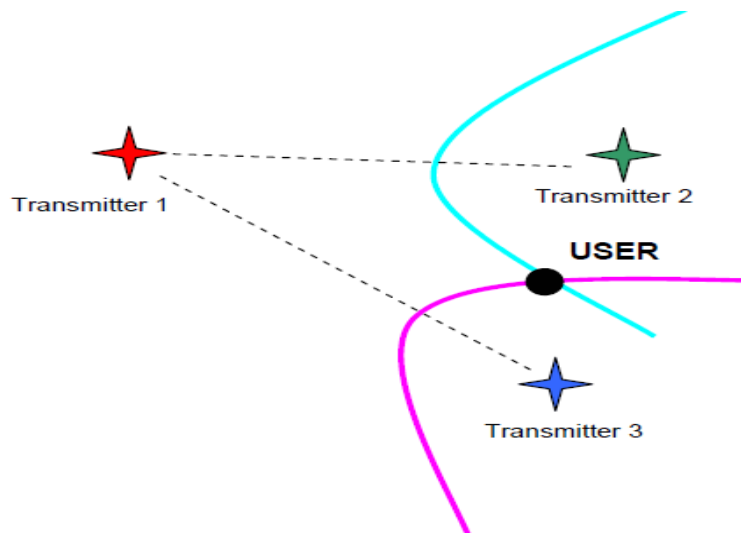
از جمله معایب سیستم ناوبری اینرسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- هزینه ساخت زیاد در صورت نیاز به دقت‌های زیاد
- افزایش خطای ناوبری با گذشت زمان
- نیاز به تراز کردن اولیه [۲]

2 Inertial Measurement Unit(IMU)

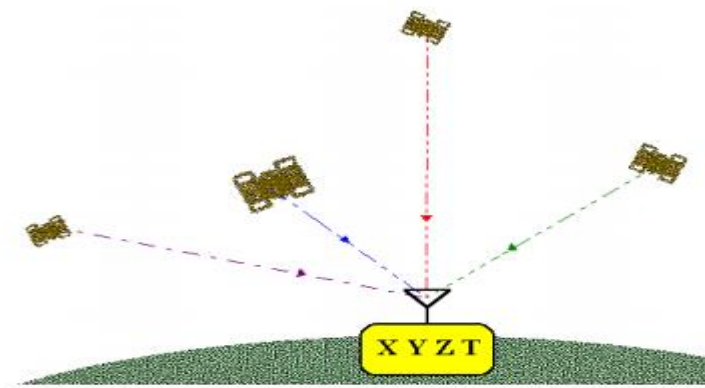
۱-۲-۲- نوبری خارجی وابسته- مانند GPS^۱

اگر در حالی که چشم‌بند به چشم شما است و فریاد می‌زنید "کجا هستیم؟" و منتظر پاسخ تماشاگران به سوال هستید سیستم نوبری خارجی وابسته خواهد بود. شکل (۴-۱) روش نوبری وابسته با استفاده از دریافت سیگنال از ارسال کننده‌های خارجی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱) روش خارجی وابسته [۳]

متداول ترین سیستم نوبری رادیویی، سامانه GPS است. این سامانه مبتنی بر استفاده از چند فرستنده



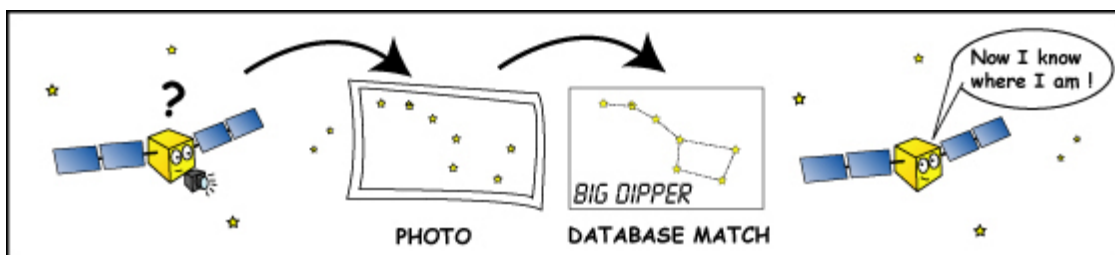
شکل (۵-۱) تعیین موقعیت و زمان توسط یک گیرنده GPS [۲]

برای تعیین موقعیت یک گیرنده است. در این سامانه از بیست و چهار ماهواره، که در مدارهای مشخصی در حال گردش به دور زمین هستند، استفاده شده است. مدار حرکتی این ماهواره‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که در هر زمان، در هر نقطه از کره زمین حداقل ۴ ماهواره در دسترس باشد (شکل (۱-۵)). گیرنده موجود در موشک، هواپیما، کشتی و نظایر آن با دریافت سیگنال‌های حاوی اطلاعات این چهار ماهواره، موقعیت دقیق مکانی خود را محاسبه می‌کند. هر چه تعداد ماهواره‌های در دسترس بیشتر باشد، دقت ناوبری نیز بیشتر می‌شود.

استفاده از سامانه تعیین موقعیت جهانی علاوه بر دقت خوب، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. اما مشکل این سیستم وابستگی به ماهواره‌های ارسال کننده است. در صورتی که ماهواره‌ها ارسال سیگنال را متوقف کنند و یا اینکه سیگنال‌های ارسالی از ماهواره‌ها دچار اغتشاش‌های خواسته یا ناخواسته شوند، سیستم تعیین موقعیت کارایی خود را از دست خواهد داد.

۱-۲-۳- ناوبری الگومحور - مانند ناوبری بر اساس شناسایی عوارض زمین

اگر چشم‌های خود را ببندید و به اطراف نگاه کنید، شما ممکن است قادر به تعیین موقعیت مکانی خود با شناخت نشانه‌های مختلف و مطابقت آنها با تصاویر موجود در حافظه خود (پایگاه داده) باشید که این سیستم ناوبری همان تطبیق پایگاه داده است. شکل (۱-۶) روش ناوبری الگومحور بر اساس شناخت نشانه‌های محیطی و تطبیق آنها با پایگاه داده را نشان می‌دهد.



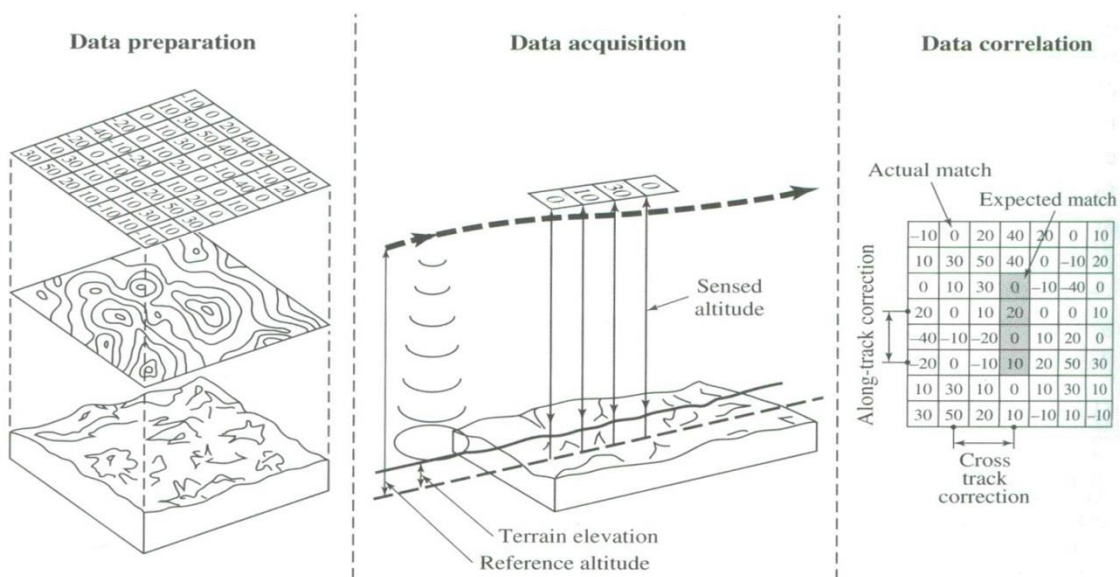
شکل (۱-۶) روش الگومحور [۳]

از جمله روش‌های مختلف ناوبری الگومحور می‌توان به ناوبری بر اساس شناسایی عوارض زمین^۱، ناوبری بر اساس صور فلکی و ستارگان^۲ و ناوبری بر اساس میدان مغناطیسی و ناوبری بر اساس میدان گرانشی زمین اشاره کرد.

1 Terrain-Based Navigation

2 Star Navigation

ناوبری بر اساس عوارض زمین، یک گروه از روش‌هایی هستند که در آنها با استفاده از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به ارتفاع زمین (با عمق) و همچنین استفاده از یک پایگاه داده مربوط به همین اطلاعات، به تعیین موقعیت پرداخته می‌شود. در این روش‌ها دنباله‌هایی از داده‌های اندازه‌گیری شده از زمین گرفته می‌شود. پس از آن یک الگوریتم جستجوگر، پایگاه داده‌های زمین را برای یافتن یک برآیند خوب با مقادیر جمع‌آوری شده مورد بررسی قرار می‌دهد (شکل (۷-۱)). پس از بدست آمدن راه کار مناسب، مسیر تقریبی و موقعیت را از بسترهای نرم‌افزاری می‌توان استخراج می‌شود. بطور کلی سیستم‌های ناوبری بر اساس عوارض زمین در زمانی که داده‌های سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای در دسترس نباشند یا قابل اطمینان نباشند، اهمیت خود را نشان می‌دهد، زیرا تداخل در آنها عملاً غیر ممکن است. همچنین آنها در سیستم‌های مختصات زمین تعیین موقعیت را انجام داده و بصورت کاملاً مستقل عمل می‌کنند [۱].



شکل (۷-۱) ناوبری بر اساس شناسایی عوارض زمین

۱-۳- ناوبری مغناطیسی

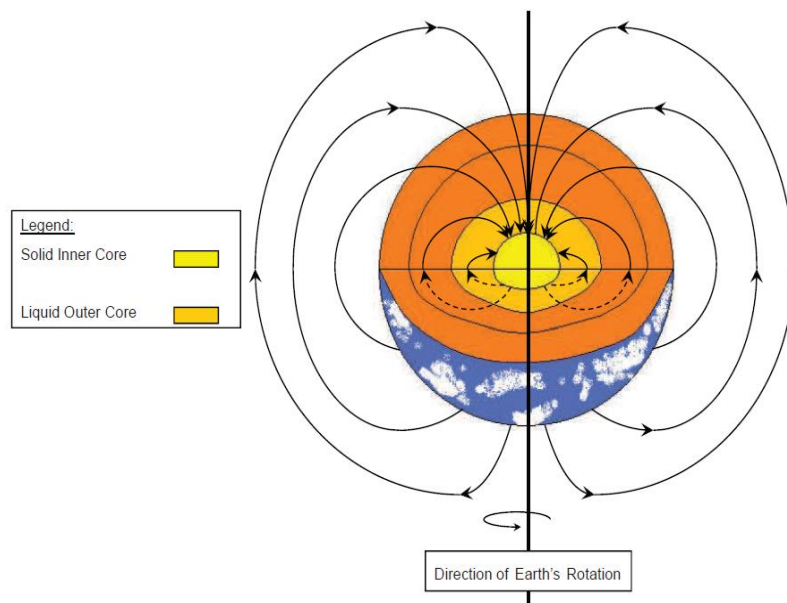
میدان مغناطیسی زمین از زمان‌های دور در قلمرو حیوانات برای ناوبری استفاده می‌شده است. حیوانات بسیاری در طبیعت وجود دارند که به طرز ماهرانه‌ای صرفاً با استفاده از میدان مغناطیسی زمین مسیر خود را به منظور رسیدن به مناطق جفت‌گیری و مناطق مهاجرت پیدا می‌کنند [۳]. در بسیاری از پرندگان، لاک‌پشت‌ها و خرچنگ‌ها توانایی استفاده از امکانات طبیعی بخشی از آناتومی

آنهاست، در حالی که در انسان این توانایی فطری نیست، بلکه انسان آن را فرا گرفته و به مرور زمان در طول قرن‌ها اصلاح کرده است.

ناوبری با استفاده از میدان مغناطیسی زمین نیازمند دانش چندین رشته مختلف می‌باشد. داشتن درکی مختصر از میدان مغناطیسی دربرگیرنده کره زمین که در واقع محیط اندازه‌گیری سنسور می‌باشد، توصیفی از سنسور مغناطیسی و خطاهای چندگانه موجود، اطلاعات لازم را برای چگونگی استفاده از میدان مغناطیسی برای ناوبری فراهم می‌کند. هنگامی که اطلاعات از طریق سنسور مغناطیسی بدست می‌آیند، چندین ابزار داده‌های اولیه را به اطلاعات مفید قابل استفاده ناوبری تبدیل می‌کنند. این ابزارها عبارتند از کالیبراسیون، تبدیل دستگاه‌ها و فیلتر کردن.

۱-۳-۱- میدان مغناطیسی زمین

لایه‌های مختلف کره زمین و میدان مغناطیسی دربرگیرنده آن که در شکل (۱-۸) به تصویر کشیده شده است نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی در هر نقطه از کره زمین قابل اندازه‌گیری است.



شکل (۱-۸) مثالی از میدان مغناطیسی زمین، دانشمندان معتقدند چرخش زمین و هسته بیرونی مایع منبع دو قطبی میدان مغناطیسی زمین است [۴]

میدان مغناطیسی دربرگیرنده کره زمین به عنوان یک دو قطبی بزرگ مغناطیسی مدل‌سازی می‌شود، در توصیف این دو قطب مخالف معمولاً از آنها به عنوان قطب شمال و جنوب یاد می‌شود. هرچند حقیقتاً این یک دو قطبی مغناطیسی نیست، اما حلقه جریان مغناطیسی ایجاد شده توسط ناحیه بیرونی هسته زمین که از یک مایع گرم و چگال ابررسانای نیکل-آهن تشکیل شده است، و ویژگی-

های مربوط به چرخش زمین و شکل آن شبیه به یک دوقطبی مغناطیسی است [۴]. بنابراین میدان مغناطیسی زمین می‌تواند به صورت مؤلفه‌های برداری مدل شود که در آن بردار میدان مغناطیسی B از سه بردار مجزای B_x و B_y و B_z (شمال/جنوب، شرق/غرب، و عمود بر سطح زمین) تشکیل شده است. مجموع شدت میدان یا شدت مغناطیسی با مقدار اسکالر $\|B\|$ نشان داده می‌شود. به طور مشابه شدت میدان افقی با $\|B_H\|$ نشان داده شده است. تغییرات میدان مغناطیسی می‌تواند ناشی از تغییر در پارامترهای تشکیل دهنده میدان مغناطیسی زمین یا اختلال باشد. تغییرات پارامترها به آرامی در طول زمان یا به دلیل تغییر در عوامل خارجیست، در حالی که اختلال تغییرات خاصی در میدان مغناطیسی محلی ایجاد می‌کند.

۱-۳-۲- سنسورهای مغناطیسی

از دوران گذشته که استفاده از قطب‌نما متداول بوده تا امروزه که اندازه‌گیری میدان مغناطیسی از فضا فراهم شده است، سنسورهای مغناطیسی در زمینه‌های مختلف توسط بسیاری از کاربران استفاده شده‌اند. اگرچه سنسورهای اولیه بر روی استفاده از میدان مغناطیسی به منظور تعیین زاویه سمت^۱ متمرکز بودند، اما سنسورهای پیچیده امروزی بر روی اندازه‌گیری مؤلفه‌های برداری مغناطیسی (B_x, B_y, B_z) تمرکز کرده‌اند [۵]. مغناطیس‌سنج‌ها در بسیاری از زمینه‌های علمی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر خلاف مغناطیس‌سنج‌های اسکالر که شدت میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند، مغناطیس‌سنج‌های برداری میدان مغناطیسی را در چندین محور اندازه می‌گیرند. در حقیقت مغناطیس‌سنج برداری ترکیب دو یا سه مغناطیس‌سنج تک محوره‌ی عمود برهم به منظور مشاهده مؤلفه‌های برداری میدان مغناطیسی می‌باشد. سنسورهایی که صرفاً برای تعیین زاویه سمت استفاده می‌شوند عموماً شامل یک جفت مغناطیس‌سنج تک محوره هستند، به طوری که وقتی مغناطیس‌سنج روی سطح افقی قرار می‌گیرد زاویه سمت مغناطیسی را می‌توان محاسبه کرد.

سنسورها بسته به نوع کاربردشان می‌توانند مؤلفه‌های مختلف میدان مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری کنند. خروجی یک مغناطیس‌سنج سه‌محوره نوعی به دلیل وجود عوامل مختلف داخلی و خارجی شامل خطا خواهد بود. به منظور بدست آوردن داده‌های مناسب توسط یک سنسور، این مشکل صرفاً باید از طریق کالیبراسیون حل شود

۱-۳-۲-۱- منابع خطای داده‌های اندازه‌گیری شده

به دلیل حضور گسترده‌ی خطاها، داده‌های اندازه‌گیری شده توسط مغناطیس‌سنج با داده‌های واقعی متفاوت‌اند. خطاهای داخلی مغناطیس‌سنج شامل بایاس^۱، ضریب مقیاس^۲ و عدم تعامد^۳ می‌باشند. میدان‌های مغناطیسی تداخلی شامل تأثیر آهن سخت^۴ و تأثیر آهن نرم^۵ مخصوص محیطی است که مغناطیس‌سنج در آن به کار برده می‌شود. این میدان‌ها با عنوان خطای محیط شناخته می‌شوند، این خطاها شامل هر نوع مواد فرومغناطیس در مجاورت مغناطیس‌سنج است، بخصوص سازه‌ای که مغناطیس‌سنج روی آن سوار شده یا داخل آن قرار گرفته است.

منابع خطای داده‌های اندازه‌گیری شده عبارتند از:

۱-۳-۲-۱-۱- خطای محیط تست

روند تجزیه و تحلیل خطای سنسور با نصب و راه‌اندازی آن شروع می‌شود. اگر بدنه مغناطیس‌سنج به اندازه کافی ایمن نباشد، تکان‌های جزئی آن ممکن است نتایج متفاوتی در خروجی بدهد. همچنین، اتصالات موجود در سنسور ممکن است شامل عناصر آهنی باشند، در نتیجه در اندازه‌گیری‌های مختلف اگر استحکام اتصالات به یک اندازه نباشد نتایج متفاوتی بدست خواهد آمد. استفاده از اتصالاتی که در آنها مواد فرومغناطیس کمتری به کار رفته باشد تا حد زیادی این نوع از خطا را کاهش می‌دهد.

منبع بعدی خطا ناشی از محیط تست است. منبع تغذیه مغناطیس‌سنج، لب‌تاب، کابل‌های برق، جعبه باتری‌ها و مواد فرومغناطیسی موجود در اطراف محیط تست، میدان مغناطیسی در مجاورت مغناطیس‌سنج‌ها را تغییر می‌دهند. تاثیرات عوامل ذکر شده که به دو نوع خطای «آهن سخت» و «آهن نرم» تقسیم می‌شوند در ادامه تشریح خواهند شد:

• خطاهای آهن سخت

برخی مواد از خود میدان مغناطیسی تولید می‌کنند. تاثیرات آهن سخت ناشی از «تغییرات آهسته زمانی میدان‌های تولید شده توسط مواد فرومغناطیس اولیه» می‌باشد [۶]. این تاثیرات عموماً ناشی از

1 Offset

2 Scale Factor

3 Non-Orthogonality

4 Hard Iron

5 Soft Iron

مواد ثابت در محیط می‌باشد. تأثیرات آهن سخت منجر به انحراف میدان مغناطیسی می‌شود و می‌تواند به عنوان یک بایاس حقیقی به صورت زیر مدل شود:

$$b^{hi} = [b_x^{hi} \quad b_y^{hi} \quad b_z^{hi}]^T \quad (1-1)$$

این بردار برای یک منطقه مشخص ثابت خواهد ماند.

• خطاهای آهن نرم

نوع دوم از تأثیر که به انحراف آهن نرم معروف است ناشی از القای مغناطیسی است. این القا به دلیل نفوذپذیری مغناطیسی مواد فرومغناطیسی در تعامل با میدان مغناطیسی خارجی است [۷]. برای مثال مواد بدنه ماشین حتی زمانی که ماشین خاموش است میدان مغناطیسی زمین را منحرف می‌کنند. تأثیرات آهن نرم توسط ماتریس متقارن زیر مدل می‌شوند:

$$C^{si} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

میزان این تأثیر به موقعیت و همچنین سایر ابزارهای نزدیک مغناطیس‌سنج وابسته است.

۱-۳-۲-۲- خطای داخلی مغناطیس‌سنج

بایاس مغناطیس‌سنج نیاز به یک ضریب تصحیح ثابت به صورت زیر دارد:

$$b^{so} = [b_x^{so} \quad b_y^{so} \quad b_z^{so}]^T \quad (3-1)$$

حتی اگر سایر خطاها برطرف شود داده‌های اندازه‌گیری شده توسط مغناطیس‌سنج A با داده‌های حاصل از مغناطیس‌سنج B به دلیل مشکلات ساخت متفاوت خواهد بود.

علاوه بر این داده‌های مغناطیس‌سنج تحت تأثیر خطای مربوط به ضریب مقیاس نیز هستند. برای مثال ممکن است میدان مغناطیسی با اندازه واقعی ۱۱۰ میلی‌گاووس در محور x ، در خروجی محور x مغناطیس‌سنج ۱۰۰ میلی‌گاووس نشان داده شود، در حالی که خروجی ۱۰ میلی‌گاووس، مقدار میدان واقعی ۱۱ میلی‌گاووس را نشان می‌دهد. نتایج ضریب مقیاس برای آن محور مغناطیس‌سنج ۱.۱ خواهد بود. خطای ضریب مقیاس، عدم قطعیت را در ثابت تناسب نشان می‌دهد و توسط یک ماتریس قطری به صورت زیر مدل می‌شود:

$$C^{sf} = \begin{bmatrix} sf_x & 0 & 0 \\ 0 & sf_y & 0 \\ 0 & 0 & sf_z \end{bmatrix} \quad (۴-۱)$$

در یک مغناطیس‌سنج ایده‌آل، همه محورها باید متعامد باشند. با این حال به دلیل مشکلات مربوط به ساخت اینچنین نیست و یک ناهم‌محوری کوچک وارد می‌شود. ضریب تصحیح برای این نوع خطاها به صورت زیر مدل می‌شود:

$$C^m = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & 1 & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (۵-۱)$$

که ε_x و ε_y و ε_z ناهم‌محوری‌ها هستند.

شناسایی این خطاها موجب ایجاد یک مدل اندازه‌گیری کامل به صورت زیر می‌شود [۷]:

$$\hat{B} = C^{sf} C^m (C^{si} B + b^{hi}) + b_{so} \quad (۶-۱)$$

در نتیجه

$$\hat{B} = CB + b \quad (۷-۱)$$

که \hat{B} بردار 3×1 اندازه‌گیری شده توسط مغناطیس‌سنج و B بردار 3×1 میدان مغناطیسی حقیقی است. ماتریس C ، ماتریس 3×3 ناشی از ضریب مقیاس، عدم تعامد و ناهم‌محوری و بردار b 3×1 بایاس مرکب است

۱-۳-۳- روش‌های کالیبراسیون

بسیاری از روش‌های کالیبراسیون موجود به نوع مغناطیس‌سنج و همچنین کاربرد مورد نیاز بستگی دارد. اطلاعاتی که از میدان مغناطیسی زمین در دسترس است و همچنین تکنیک‌های کالیبراسیون مختلف می‌توانند در راه‌حل‌های مختلف مفید واقع شوند.

کالیبراسیون مغناطیس‌سنج معمولاً به ۱۲ پارامتر نیازمند است: سه بایاس (یا افسست) و نه پارامتر مربوط به ماتریس C . متداول‌ترین روش کالیبراسیون داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگر مغناطیسی روش تطبیق بیضی است که در ادامه شرح داده خواهد شد.

۱-۳-۳-۱- تطبیق بیضی

بسته به امکان انواع مختلفی از روش‌های تطبیق بیضی جزو روش‌هایی هستند که برای کالیبراسیون میدان مغناطیسی زمین به کار می‌روند [۷-۱۴].

دلایل استفاده از تطبیق بیضی واضح است. هیچ تجهیزات اضافی مورد نیاز نیست، روال کار بسیار ساده است و مشخصات میدان مغناطیسی زمین به سادگی از مدل داده شده بر حسب طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع بدست می‌آید.

یک مدل ساده برای داده‌های میدان مغناطیسی عبارت است از:

$$\hat{B} = CB + b + v \quad (۸-۱)$$

که \hat{B} بردار 3×1 داده‌های اندازه‌گیری توسط مغناطیس‌سنج و B بردار 3×1 نشان‌دهنده میدان مغناطیسی حقیقی است. ماتریس 3×3 C ترکیب فاکتورهای ضریب مقیاس، عدم تعامد و آهن نرم است و بردار 3×1 b ترکیبی از تأثیرات آهن سخت و بایاس است.

این روش به داده‌های اندازه‌گیری شده مغناطیس‌سنج در محیطی که، صرف‌نظر از چرخش سنسور، شدت میدان مغناطیسی $\|B\|$ ثابت باشد، متکی است. این موضوع زمانی صادق است که مغناطیس-سنج کاملاً دور از مواد آهنی قرار داده شود یا موقعیت نسبی مواد آهنی نسبت به مغناطیس‌سنج ثابت باشد. در این صورت داده‌های اندازه‌گیری شده همزمان با چرخش سنسور حول هر سه محور در زوایای متفاوت باید یک کره با شعاع برابر با شدت میدان مغناطیسی $\|B\|$ تشکیل دهند. اما داده‌های بدست آمده معمولاً مطلوب نیستند و یک بیضی می‌سازند. اعمال الگوریتم‌های شرح داده شده در مراجع [۷-۱۴] به منظور تطبیق داده‌های بیضی اندازه‌گیری شده میدان مغناطیسی روی کره‌ای با شدت میدان مشخص منجر به استخراج بایاس b و ماتریس تبدیل $A=C^{-1}$ می‌شود.

روش تطبیق بیضی مناسب‌ترین ماتریس تصحیح $A=C^{-1}$ و بردار بایاس b را می‌یابد به طوری که بهترین تخمین برای میدان مغناطیسی حقیقی بدست آید.

۱-۳-۴- الگوریتم‌های ناوبری مغناطیسی

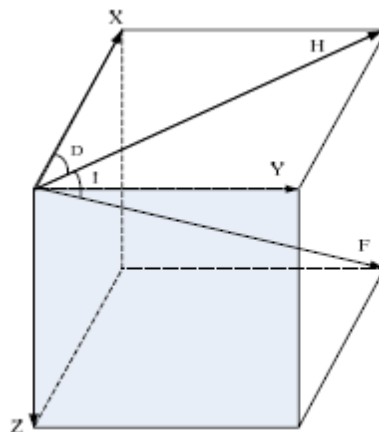
در سال‌های اخیر الگوریتم‌های مختلفی برای پردازش داده‌های میدان مغناطیسی زمین به منظور دستیابی به ناوبری مغناطیسی پیشنهاد شده است. با توجه به روش‌های مختلف پردازش داده‌های مغناطیسی دو روش کلی برای پیاده‌سازی ناوبری مغناطیسی وجود دارد: روش اول الگوریتم‌های

تطبیق بر نقشه و روش دوم الگوریتم های فیلترسازی می باشد. الگوریتم های مختلفی برای تطبیق وجود دارند که از جمله آن ها می توان به الگوریتم های MAD^1 ، MSD^2 ، $ICCP^3$ ، تئوری ریاضی دمپستر-شافر⁴ (تئوری اعتقاد)، منطق فازی، شبکه عصبی و نظایر آن اشاره کرد و الگوریتم های معروف تخمین عبارتند از فیلتر کالمن⁵ و انواع توسعه یافته آن، فیلتر ذره ای⁶ و انواع توسعه یافته آن [۱۵].

۱-۳-۴-۱- الگوریتم های تطبیق بر نقشه

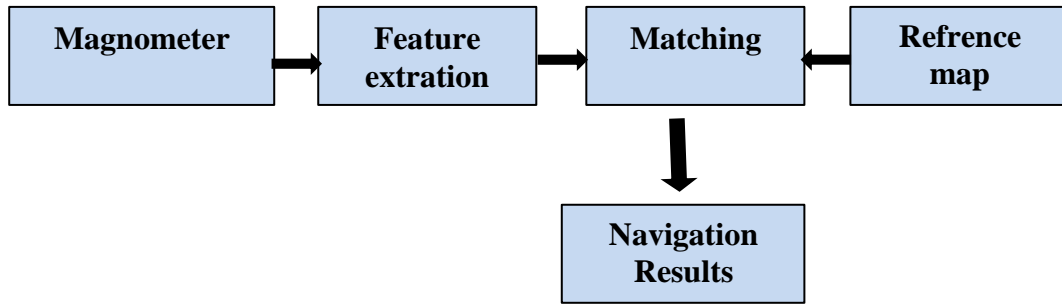
اساس تطبیق مغناطیسی همانند تطبیق عوارض زمین می باشد که به صورت گسترده در سیستم های ناوبری و سایل نقلیه هوایی استفاده شده است. نکته کلیدی در این نوع از الگوریتم ها مقایسه شدت مغناطیسی اندازه گیری شده با نقشه های مرجع به منظور یافتن نقاط بسیار مشابه است. میدان مغناطیسی زمین مولفه های متفاوتی دارد که می توانند برای تطبیق استفاده شوند که عبارتند از شدت میدان کل F ، مولفه افقی H ، مولفه شمالی X ، مولفه شرقی Y ، مولفه عمودی Z ، زاویه انحراف مغناطیسی D ، زاویه میل I .

شکل (۹-۱) مولفه های میدان مغناطیسی زمین در دستگاه مختصات دکارتی و شکل (۱-۱۰) فرایند تطبیق مغناطیسی را نشان می دهد.



شکل (۹-۱) مولفه های میدان مغناطیسی زمین

-
- 1 Mean Absolute Difference
 - 2 Mean Square Difference
 - 3 Iterative Closest Contour Point Algorithm
 - 4 Dempster-Shafer theory
 - 5 Kalman Filter
 - 6 Particle filter



شکل (۱-۱۰) فرایند تطبیق مغناطیسی

وقتی که یک وسیله پروازی از یک منطقه عبور می‌کند، مغناطیس‌سنج نصب شده روی این وسیله مجموعه‌ای از داده‌های مغناطیسی را جمع‌آوری کرده و این مجموعه را با مجموعه مقادیر مختلف بدست آمده از نقشه‌های مرجع مقایسه می‌کند.

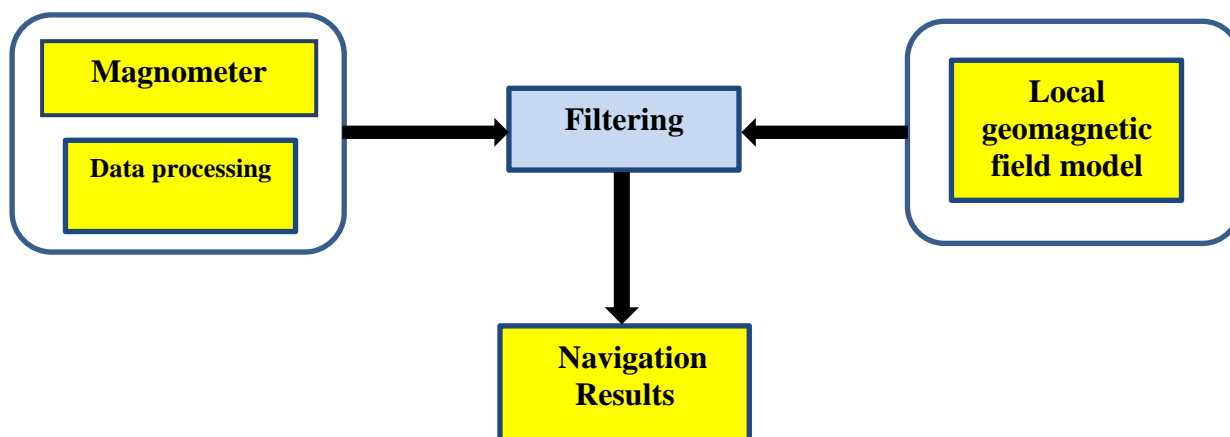
۱-۳-۴-۲- الگوریتم‌های تخمین غیرخطی

روش‌های تخمین غیرخطی به صورت گسترده در سیستم‌های ناوبری استفاده می‌شود. مانند UKF^1 ، EKF^2 و نظایر آن. آنها می‌توانند به صورت برخط پارامترهای INS را بهبود بخشیده و سیستم غیرخطی را مدیریت کنند. بردارهای حالت تخمینگر غیرخطی عبارتند از موقعیت، سرعت و وضعیت. با اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین روی یک وسیله نقلیه مشخص می‌توان بردار حالت مربوط به این وسیله را اصلاح کرد.

یکی از روش‌های موجود برای تخمین غیرخطی EKF است که شکل (۱-۱۱) بلوک دیاگرام مربوط به آن را نشان می‌دهد.

1 Unscented Kalman Filter

2 Extended Kalman Filter



شکل (۱-۱) دیاگرام اساسی فیلتر کردن مغناطیسی

۱-۴- تعریف مسئله

در سال‌های اخیر با توجه به نیاز به افزایش دقت در انواع وسایل پروازی و نیاز به یک سامانه غیرفعال برای تعیین موقعیت، در دسترس بودن سیستم تعیین موقعیت با چنین قابلیت‌هایی به امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر مبدل گردیده است. اگرچه عیب اصلی سامانه اینرسی، که اصلی‌ترین سیستم تعیین موقعیت در حال حاضر می‌باشد، خطای افزایشی آن است، اما کاربرد رایج سیستم *INS* در انواع وسایل نقلیه زمینی و هوایی گواهی بر کارایی و ارزش این سیستم‌ها به عنوان یک سیستم ناوبری است. سیستم‌های کنونی که در سامانه تعیین موقعیت به سیستم *INS* کمک می‌کنند، از نقاط قوت این سیستم می‌کاهند. به گمان خیلی از کاربران بهترین سیستم مکمل برای *INS* سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای می‌باشد و جوابگوی نیاز کاربران است. اما با توجه به فناوری‌های کنونی سیگنال‌های این سیستم‌ها و در نتیجه اطلاعاتی که در اختیار کاربران قرار می‌گیرد قابل تخریب هستند. روش تعیین موقعیت با استفاده از اطلاعات میدان مغناطیسی زمین، یکی از روش‌های نوین در حوزه ناوبری بوده و قادر است بسیاری از مشکلات و نقاط ضعف سیستم‌های تعیین موقعیت فعلی نظیر GPS را برطرف کند. از مشکلات GPS می‌توان به جمینگ^۱ و اختلال، فعال و قابل شناسایی بودن اشاره کرد. اگرچه در گذشته مطالعات کمتری در زمینه تعیین موقعیت با استفاده از اطلاعات مغناطیس‌سنج انجام شده است، با این حال استفاده از حسگرهای مغناطیسی با در نظر گرفتن یک سطح خطای قابل قبول برای استفاده در وسایل نقلیه زمینی و هوایی یک تعیین موقعیت موفقیت-آمیزی را در پی دارد.

¹Jammig

۱-۵- ساختار پایان نامه

تحقیق حاضر، ارزیابی استفاده از اطلاعات میدان مغناطیسی زمین به منظور تعیین موقعیت در سیستم‌های ناوبری می‌باشد. در این پایان نامه ابتدا داده‌های مربوط به میدان مغناطیسی زمین که اساس ناوبری مبتنی بر میدان مغناطیسی زمین است در محدوده طول جغرافیایی ۵۲.۵ الی ۵۳ درجه و عرض جغرافیایی ۳۶.۵ الی ۳۷ درجه^۱ تولید می‌شود. در روش پیشنهادی ابتدا یک مدل عصبی پرسپترون چند لایه^۲ از مجموعه داده‌های میدان مغناطیسی منطقه آزمایش با استفاده از روش آموزش پس انتشار خطای^۳ با سرپرست^۴ و الگوریتم‌های گرادیان نزولی^۵ و آموزش مختلط^۶ با توجه به روند تغییرات میدان مغناطیسی زمین ایجاد شده است.

سپس با استفاده از شبکه MLP آموزش دیده، داده‌های مربوط به مسیر که روش اینجا آنها در ادامه شرح داده خواهد شد به شبکه اعمال شده و خروجی شبکه به عنوان نتایج تعیین موقعیت بدست آمده است.

ساختار و محتوای پایان نامه شامل پنج فصل است که مختصری از فصل‌های آتی در ادامه آورده شده است:

فصل دوم- میدان مغناطیسی زمین: این فصل به نحوه تولید نقشه‌های میدان مغناطیسی مرجع که بیانگر مقدار مولفه‌های میدان مغناطیسی در هر نقطه در منطقه مورد مطالعه است می‌پردازد. همچنین در این فصل نحوه بدست آوردن مسیرها و تولید نویز متناسب با حسگر مغناطیسی بیان شده است.

فصل سوم- روش پیشنهادی جهت تعیین موقعیت: در این فصل نحوه ایجاد یک شبکه عصبی MLP به همراه الگوریتم‌های آموزش پیشنهادی جهت تنظیم پارامترهای آن ارائه می‌گردد.

۱ محدوده فوق مربوط به دریای خزر می‌باشد.

2 Multi Layer Perceptron(MLP)

3 Back Propagation Error

4 Supervised Learning

5 Steepest Descent(SD)

6 Hybrid Learning

فصل چهارم-پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج: در این فصل پس از توصیف مناطق آزمون، ابتدا نحوه پیاده‌سازی سیستم تعیین موقعیت ذکر می‌گردد و به دنبال آن نتایج مرتبط به این روش بیان می‌گردد. فصل پنجم- نتیجه گیری و پیشنهادات: جمع بندی و پیشنهادات برای کارهای آتی در این فصل ذکر می‌گردد.

فصل ۲:

میدان مغناطیسی زمین

۲-۱- مقدمه

طی سال‌های اخیر پیشرفت‌های علمی و گسترش نیاز به سامانه‌های ناوبری دقیق به همراه افزایش دقت سنسورهای اندازه‌گیری، محققان را به فکر استفاده از میدان مغناطیسی جهت مکان‌یابی بر روی سطح زمین انداخته است. در این روش ابتدا با استفاده از سنسورهای مغناطیسی، اطلاعات میدان مغناطیسی زمین قرائت شده و سپس با مقایسه این اطلاعات با نقشه مرجع (حاصل از مدل‌های جهانی) امکان تعیین موقعیت فراهم می‌گردد.

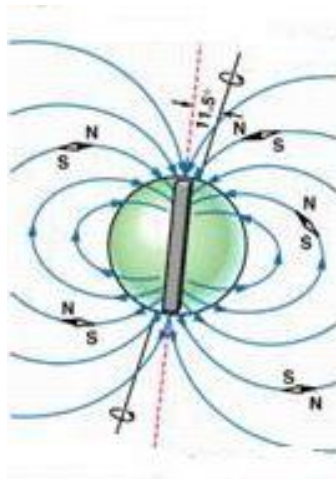
بدین منظور در قدم اول برای دستیابی به سامانه موقعیت‌یاب مغناطیسی، نیاز به تحلیل دقیق میدان مغناطیسی زمین و اطلاع کافی از کمیت و کیفیت آن می‌باشد. لذا در این فصل ابتدا میدان مغناطیسی زمین معرفی شده و پارامترهای مستقل و وابسته مربوط به این میدان معرفی می‌شوند. سپس مدل¹ WMM2015 انتخاب شده برای استفاده در این پایان‌نامه معرفی می‌شود. در نهایت نحوه بدست آوردن داده‌های مربوط به مسیر به منظور اعمال به شبکه آموزش دیده و همچنین نحوه اعمال نویز به این داده‌ها بیان می‌گردد.

۲-۲- میدان ژئومغناطیس

همان‌گونه که می‌دانید در طبیعت برخی از اجسام دارای این خاصیت هستند که می‌توانند ذرات آهن را جذب نمایند. این اجسام آهن‌ربای طبیعی نامیده شده و فقط در فاصله معینی قادر به جذب ذرات آهن می‌باشند که به آن میدان مغناطیسی می‌گویند.

کره زمین نیز به دلیل اختلاف دمای بخش‌های داخلی آن (در اعماق مختلف) و جریان‌های الکتریکی مربوط به حرکت مواد مذاب در هسته بیرونی، خود به عنوان یک مغناطیس بزرگ رفتار می‌نماید. در حقیقت ثابت گردیده است که میدان مغناطیسی زمین تقریباً معادل میدان مغناطیسی میله‌ای آهن‌ربایی است که در مرکز زمین و در امتداد محور دوران آن قرار گرفته و خطوط میدان مغناطیسی مربوط به آن از قطب شمال خارج شده و پس از عبور از محیط اطراف به قطب جنوب منتهی می‌گردند شکل (۲-۱).

1 World Magnetic Model 2015



شکل (۱-۲) دو قطبی مغناطیسی زمین

۱-۲-۲- ماهیت میدان ژئومغناطیسی

زمین مانند بیشتر سیارات منظومه شمسی دارای میادین سیاره‌ای با منشا داخلی می‌باشد. یکی از این میدان‌ها حضور یک دو قطبی مغناطیسی با چگالی شار حدود ۶۰۰۰۰ نانو تسلا در نزدیکی قطبین^۱ و ۳۰۰۰۰ نانو تسلا در استوا می‌باشد [۱۶]. بدین ترتیب هرگاه یک عقربه مغناطیسی را بر روی پایه‌ای بدون اصطکاک در این میدان قرار دهیم، پس از نوسانات متعدد، در امتدادی می‌ایستد که آن را امتداد شمال و جنوب مغناطیسی می‌گویند. این امر نشان می‌دهد که عقربه تحت تاثیر میدان ژئومغناطیسی می‌باشد.

میدان حاصل از دو قطبی مغناطیسی زمین (و یا به اختصار میدان ژئومغناطیسی) کمیتی برداری است که با تغییر موقعیت در فضا^۲ و تغییرات زمانی^۳ تغییر می‌کند [۱۷]. همچنان که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است مهم‌ترین منابع تولید این میدان عبارت از میدان اصلی و یا میدان ناشی از هسته (B_m)، میدان ناشی از پوسته یا لیتوسفر (B_c) و میدان خارجی (B_d) که ناشی از یونسفر و مگنتوسفر می‌باشند [۱۸]. بدین ترتیب میدان ژئومغناطیسی کل را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۱۹]:

۱ قطب شمال مغناطیسی واقع در طول جغرافیایی ۹۶ درجه غربی و عرض جغرافیایی ۷۰ درجه شمالی و قطب جنوب مغناطیسی در طول جغرافیایی ۱۴۰ درجه شرقی و عرض ۶۸ درجه جنوبی واقع می‌باشد.

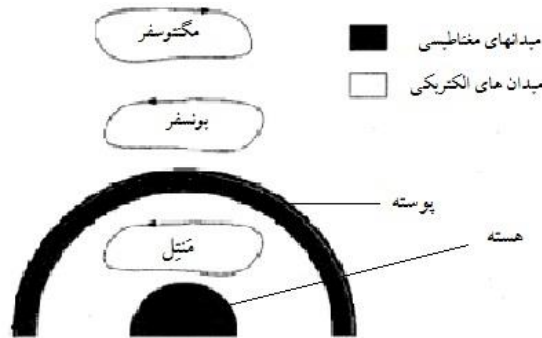
۲ بایستی توجه داشت که شدت میدان مغناطیسی زمین در تمام نقاط یکنواخت نبوده و حتی در یک نقطه نیز متغیر است.

3 Spatial

4 Temporal

$$B(r,t) = B_m(r,t) + B_c(r,t) + B_d(r,t)$$

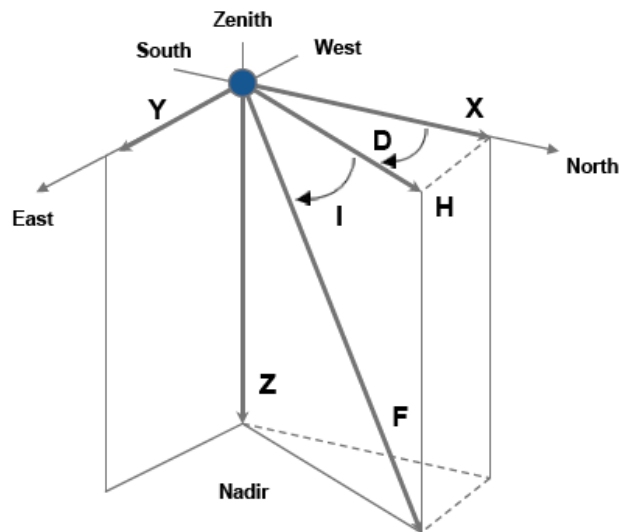
(۱-۲)



شکل (۲-۲) بخش‌های مختلف تاثیرگذار در میدان مغناطیسی زمین

۲-۲-۲- مولفه‌های میدان ژئومغناطیس

از آنجایی که قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین بر هم منطبق نیستند، عقربه مغناطیسی امتداد شمال - جنوب را فقط به صورت تقریبی معین می‌کند. لذا در هر نقطه، صفحه‌ای که عقربه مغناطیسی در آن قرار می‌گیرد را اصطلاحاً صفحه نصف‌النهار مغناطیسی آن نقطه نامیده و خط مستقیم گذرنده از نقطه که در امتداد آن صفحه نصف‌النهار مغناطیسی قطع می‌گردد را نصف‌النهار مغناطیسی می‌نامند. با این مقدمه میدان ژئومغناطیس را با مولفه‌های ذیل مشخص می‌کنند (شکل (۲-۳)).



شکل (۲-۳) مولفه‌های میدان ژئومغناطیس

۲-۲-۱- انحراف میدان ژئومغناطیسی

در هر نقطه زاویه بین نصف‌النهار مغناطیسی و نصف‌النهار جغرافیایی گذرنده بر آن نقطه (شمال جغرافیایی) را زاویه انحراف مغناطیسی^۱ نامیده و معمولاً با D نشان می‌دهند [۱۹]. این زاویه در نواحی مختلف کره زمین متفاوت بوده و بسته به موقعیت نقطه در سطح زمین، قطب شمال مغناطیسی از نصف‌النهار مغناطیسی به سمت مغرب (W) و یا مشرق (E) منحرف می‌شود. از این رو انحراف مغناطیسی در گستره‌ای از 0° تا 180° درجه مدرج گردیده و معمولاً انحراف شرقی با علامت مثبت و انحراف غربی با علامت منفی نشان داده می‌شود.

۲-۲-۲- میل میدان ژئومغناطیسی

خطوط میدان مغناطیسی زمین معمولاً به موازات سطح زمین نیستند. این بدان معناست که القای میدان مغناطیسی زمین در سطحی افقی گذرنده از نقطه قرار ندارد، بلکه زاویه معینی با این سطح نشان می‌دهد. این زاویه را میل (شیب) میدان مغناطیسی^۲ می‌نامند و جهت مثبت آن به سمت پائین می‌باشد. زاویه میل را با I نشان داده و در نقاط مختلف سطح زمین متفاوت می‌باشد (شکل ۲-۳). بدین ترتیب استوای مغناطیسی عبارت از مکان هندسی نقاطی است که در آنجا زاویه میل صفر بوده ($I=0$) و قطب مغناطیسی مکان هندسی نقاطی می‌باشد که در آنجا زاویه میل $\pm 90^\circ$ درجه است. لازم به ذکر است حداکثر انحراف استوای مغناطیسی از استوای جغرافیایی ۱۵ درجه می‌باشد.

۲-۲-۳- شدت میدان ژئومغناطیسی (F)

شدت میدان مغناطیسی متناسب است با نیرویی که میدان در هر نقطه بر یک آهن‌ربا اعمال نموده و با نماد F و واحد آرستد^۳ یا تسلا نمایش داده می‌شود. بزرگی شدت میدان ژئومغناطیس در قطب شمال و جنوب به ترتیب برابر 60000 و 70000 نانو تسلا می‌باشد که این مقدار بیشترین مقدار شدت میدان مغناطیسی زمین می‌باشد. همچنین کمترین مقدار شدت میدان ژئومغناطیس مربوط به نقطه‌ای در اقیانوس آرام (در شمال شیلی) و در حدود 25000 نانو تسلا است.

لازم به ذکر است مولفه‌های F معمولاً در سه امتداد رایج شمال (X)، شرق (Y) و پایین (Z) اندازه‌گیری شده و مولفه افقی این نیرو با H نشان داده می‌شود (شکل ۲-۳).

جدول (۱-۲) محدوده مورد انتظار المان‌های مغناطیسی را در سطح زمین نشان می‌دهد.

1 Declination

2 Inclination

3 Oersted

جدول (۱-۲) دامنه المان‌های مغناطیسی در سطح زمین [۱۹]

المان	نام	نام جایگزین	محدوده در سطح زمین			جهت
			حداقل	حداکثر	واحد	
X	مؤلفه شمالی	شدت شمالی	-۱۷۰۰۰	۴۲۰۰۰	نانو تسلا	شمال
Y	مؤلفه شرقی	شدت شرقی	-۱۸۰۰۰	۱۷۰۰۰	نانو تسلا	شرق
Z	مؤلفه رو به پایین	شدت عمودی	-۶۷۰۰۰	۶۱۰۰۰	نانو تسلا	پایین
H	شدت افقی	-	۰	۴۲۰۰۰	نانو تسلا	-
F	شدت کل	میدان کل	۲۲۰۰۰	۶۷۰۰۰	نانو تسلا	-
I	میل	شیب	-۹۰	۹۰	درجه	پایین
D	انحراف	تغییر مغناطیسی	-۱۸۰	۱۸۰	درجه	شرق/در جهت عقربه ساعت

بدین ترتیب می‌توان بردار میدان ژئومغناطیس (\vec{B}) را توسط یک مجموعه سه عنصری (مختصه‌ای) مناسب از میان هفت عنصر ممکن (X, Y, Z, H, F, I, D) به‌طور کامل توصیف کرد. به‌عنوان مثال یک مجموعه سه عضوی متعامد می‌تواند متشکل از مولفه‌های شدت میدان در جهت شمالی (X)، شرقی (Y) و عمودی (Z) و یا مجموعه شامل شدت کل (F)، زاویه میل (I) و زاویه انحراف (D) باشد. بدیهی است در صورت دسترسی به یک مجموعه کامل از این داده‌ها می‌توان با استفاده از روابط زیر سایر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه نمود [۲۰].

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (۲-۲)$$

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (۳-۲)$$

$$I = \arctan(Z / H) \quad (۴-۲)$$

$$D = \arctan(Y / X) \quad (۵-۲)$$

۲-۳- مدل ژئومغناطیس

مدل‌های ژئومغناطیس یک توصیف کلی (جهان شمول) از میدان مغناطیسی زمین را جهت مقاصد علمی و کاربردی عرضه می‌کند^۱. لیکن از آنجایی که میدان ژئومغناطیس با گذشت زمان تغییر می‌نماید دستیابی به مدلی که بتواند مقادیر میدان را در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه نماید، امری ضروری و بسیار پیچیده می‌باشد. برای این منظور طی چند دهه گذشته تلاش‌های بسیاری جهت ایجاد یک مدل جامع ژئومغناطیس با استفاده از ادغام داده‌های جمع‌آوری شده در دوره‌های زمانی مختلف و استفاده از مشاهدات زمینی، دریایی، هوایی و در این اواخر ماهواره‌ای صورت گرفته است. با این مقدمه در ادامه این مدل WMM2015 مورد استفاده در این پایان‌نامه ارائه می‌گردد. لیکن پیش از معرفی این مدل ابتدا به بررسی مدل ریاضی عمومی میدان ژئومغناطیسی می‌پردازیم.

۲-۳-۱- مدل ریاضی میدان ژئومغناطیس

در سال ۱۸۳۹، گاوس تحلیل هارمونیک‌های کروی را توسعه داد، که هنوز متداول‌ترین روش مورد استفاده برای بدست آوردن مدل‌های جهانی میدان مغناطیسی زمین می‌باشد. جزئیات بیشتر این تکنیک را می‌توان در مرجع [۲۱] مشاهده نمود.

میدان مغناطیسی اصلی زمین یعنی B_m یک پتانسیل میدانی است که می‌توان آن را در مختصات کروی بر حسب مولفه‌های (r, λ, ϕ') نوشت. این پتانسیل میدانی را می‌توان به صورت منفی گرادیان یک پتانسیل برداری در نظر گرفت که در معادله لاپلاس $\nabla^2 V = 0$ صدق می‌کند [۱۹].

$$B_m(\lambda, \phi', r, t) = -\nabla V(\lambda, \phi', r, t) \quad (۲-۶)$$

بدین ترتیب برای میدانی که منشأ آن از داخل زمین می‌باشد پتانسیل V را می‌توان بر حسب یک سری از توابع هارمونیک کروی بسط داد.

$$V(\lambda, \phi', r, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left\{ \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)) \right\} \bar{P}_n^m(\cos\phi') \quad (۲-۷)$$

۱ به عنوان مثال پیش‌بینی توزیع میدان در موقعیت‌ها و یا زمان‌های مختلف بدون مشاهده مستقیم و یا مطالعه تغییرات میدان و فرآیندهای وابسته به آن در اعماق زمین برخی از کاربردهای این گونه مدل‌ها را شامل می‌گردد.

که در آن n درجه بسط، m مرتبه بسط، α شعاع زمین معادل 6371200 متر، λ ، ϕ' و r به ترتیب طول و متمم عرض جغرافیایی و ارتفاع، $g_n^m(t)$ و $h_n^m(t)$ ضرایب گاوسی وابسته به زمان از درجه n و مرتبه m می باشند. همچنین $\check{P}_n^m(\mu)$ نیز توابع لژاندر وابسته شبه نرمال اشمیت¹ از درجه n و مرتبه m بوده و به فرم زیر تعریف می شوند:

$$\check{P}_n^m(\mu) = \sqrt{2 \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_{n,m}(\mu) \text{ if } m > 0 \quad (8-2)$$

$$\check{P}_n^m(\mu) = P_{n,m}(\mu) \text{ if } m = 0$$

بدین ترتیب جواب تابع پتانسیل برداری V را بر حسب سه مولفه برداری X ، Y و Z می توان به صورت زیر نوشت:

$$X'(\lambda, \phi', r) = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \phi'}$$

$$= -\sum_{n=1}^{12} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda \frac{d\check{P}_n^m(\sin \phi')}{d\phi'} \quad (9-2)$$

$$Y'(\lambda, \phi', r) = -\frac{1}{r \cos \phi'} \frac{\partial V}{\partial \lambda}$$

$$= \frac{1}{\cos \phi'} \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n g_n^m(t) \sin m\lambda - h_n^m(t) \cos m\lambda \check{P}_n^m(\sin \phi')$$

$$Z'(\lambda, \phi', r) = \frac{\partial V}{\partial r}$$

$$= \sum_{n=1}^{12} (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda \check{P}_n^m(\sin \phi') \quad (11-2)$$

که پس از تبدیل، سه مولفه میدان مغناطیسی زمین به فرم زیر نوشته می شوند:

$$X = X' \cos(\phi' - \phi) - Z' \sin(\phi' - \phi)$$

$$Y = Y' \quad (12-2)$$

$$Z = X' \sin(\phi' - \phi) + Z' \cos(\phi' - \phi)$$

¹Schmidt Quasi-Normalized Associated Legendre Functions

همان طور که دیده شد تنها ضرایبی که در محاسبه میدان مغناطیسی زمین بر حسب زمان متغیر هستند ضرایب $g_n^m(t)$ و $h_n^m(t)$ می باشند. مقادیر این ضرایب با گذشت زمان تغییر کرده و برای این که روابط مدل مغناطیسی زمین برای همه زمان ها صحیح باشد، این ضرایب نیز می بایست با گذر زمان اصلاح گردند.

به طور مشابه میدان هایی را که منشأ آنها از خارج از زمین می باشد را می توان به طور مشابه توسط پتانسیل V_e بیان کرد:

$$V_e(\lambda, \phi', r, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left\{ \left(\frac{r}{a} \right)^n (q_n^m(t) \cos(m\lambda) + s_n^m(t) \sin(m\lambda)) \right\} \bar{P}_n^m(\cos\phi') \quad (2-13)$$

که در آن $q_n^m(t)$ و $s_n^m(t)$ ضرایب گاوسی وابسته به زمان از درجه n و مرتبه m می باشند. میر و مایر^۱ در سال ۲۰۰۶ نشان دادند که می توان میدان مغناطیسی زمین را از رهیافت دیگری، توسط توابع کرنل برداری، مدل نمود، که توابع مقیاسی برداری^۲ و موجک^۳ نامیده می شوند [۲۲]. یکی از مزیت های اصلی این روش داشتن سیستمی از هارمونیک های کروی برداری می باشد، که میدان برداری داده شده را بر حسب منابع آن جداسازی می کند. بدین معنی که میدان برداری کروی به یک بخش که توسط منبعی داخل کره مرجع بوجود آمده و بخشی که توسط منبعی از خارج کره تولید شده و به یک بخشی که از منبعی بر روی کره تولید شده (برای مثال جریان هایی که سطح کره را قطع می کنند) تقسیم می شود. با استفاده از این سیستم هارمونیک های کروی برداری، می توان توابع مقیاسی برداری و موجک ها را ساخت که خاصیت جداسازی توابع را بر حسب منابع در بر دارد. معروفترین مدل میدان ژئومغناطیسی که به طور متداول برای تعیین زاویه انحراف توسط قطب نما مغناطیسی استفاده می شود مدل IGRF^۴ می باشد. این مدل بر پایه تحلیل هارمونیک های کروی کلاسیک بنا نهاده شده و شامل میدان اصلی و تغییرات (زمانی) مدت دار خطی^۵ از سال ۱۹۰۰ به بعد می باشد.

1 Mayer and Maier

2 Vector Scaling Function

3 Wavelet

1 International Geomagnetic Reference Field

2 Linear Secular Variation

۲-۳-۲- مدل WMM2015

«مدل مغناطیسی جهانی» محصول مشترک مرکز ملی داده‌های ژئوفیزیکی ایالات متحده^۱ و سازمان زمین‌شناسی بریتانیا^۲ می‌باشد. این مدل به عنوان مدل استاندارد توسط وزارت دفاع ایالات متحده^۳، وزارت دفاع بریتانیا^۴، سازمان پیمان آتلانتیک شمالی^۵ و سازمان بین‌المللی هیدروگرافی^۶ برای کاربردهای ناوبری و سامانه‌های مرجع تعیین سمت و وضعیت بکار گرفته شده است. کاربرد اصلی مدل مغناطیسی جهانی WMM فراهم نمودن زاویه انحراف مغناطیسی در هر نقطه بر روی کره زمین می‌باشد. علاوه بر این مدل WMM هندسه کاملی از میدان مغناطیسی را از عمق یک کیلومتری زیر سطح زمین تا ارتفاع ۸۵۰ کیلومتری بالای سطح زمین فراهم می‌کند [۱۹].

۲-۳-۱- دقت مدل WMM2015

میدان مغناطیسی زمین از چندین منبع مختلف سرچشمه می‌گیرد و تمامی این منابع تجهیزات ناوبری و علمی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، لیکن فقط تعدادی از این منابع در مدل WMM نمایش داده می‌شوند. در این بین بیشترین سهم در این مدل میدان مغناطیسی مربوط به آهن مذاب هسته بیرونی زمین می‌باشد که معمولاً میدان هسته نیز نامیده می‌شود. آهن‌رباهای معدنی موجود در پوسته و منتل بیرونی^۷ سهم دیگری از میدان را در این مدل دارند که بیشتر به صورت موضعی (منطقه‌ای) می‌باشد. جریان‌های الکتریکی القا شده توسط شارش آب‌های دریاها (که رسانا می‌باشند) سهم دیگری از میدان حاصل از این مدل را شامل می‌گردند. بدین ترتیب با جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و حذف داده‌های مربوط به میدان‌های اختلالی^۸ مدل WMM تهیه می‌گردد. روش ریاضی بکار گرفته شده در مدل WMM بسط پتانسیل مغناطیسی بر حسب توابع هارمونیک کروی تا درجه و مرتبه ۱۲ می‌باشد.

1 U.S. National Geophysical Data Center (NGDC)

2 British Geological Survey (BGS)

3 U.S. Department of Defense (DoD)

4 U.K. Ministry of Defence

5 North Atlantic Treaty Organization (NATO)

6 International Hydrographic Organization (IHO)

7 Upper Mantle

8 Disturbance Field

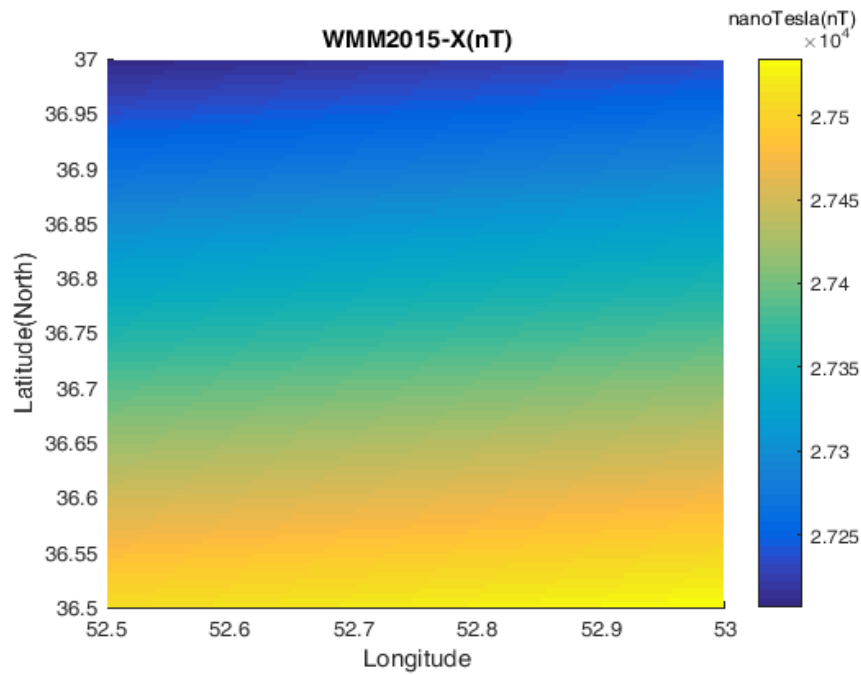
به طور خلاصه مدل WMM در واقع مدل میدان‌های مغناطیسی داخلی است که میدان اختلالی از آن حذف شده است. بنابراین این مدل تقریباً شامل تمام میدان هسته و قسمتی از پوسته و اقیانوسی می‌باشد.

بدین ترتیب از آنجایی که میدان هسته به‌طور محسوسی از یک سال به سال دیگر تغییر می‌کند. این اثر که تغییرات مدت‌دار زمانی نامیده می‌شود در مدل WMM توسط یک مدل خطی گنجانده می‌شود. با این وجود به واسطه تغییرات غیرخطی و غیرقابل پیش‌بینی در میدان هسته، مقادیر ضرایب WMM باید هر پنج سال یک‌بار بروز شوند. لذا نسخه‌ای که در این پایان‌نامه بررسی می‌شود آخرین نسخه مدل WMM (WMM2015) است که برای بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ معتبر می‌باشد.

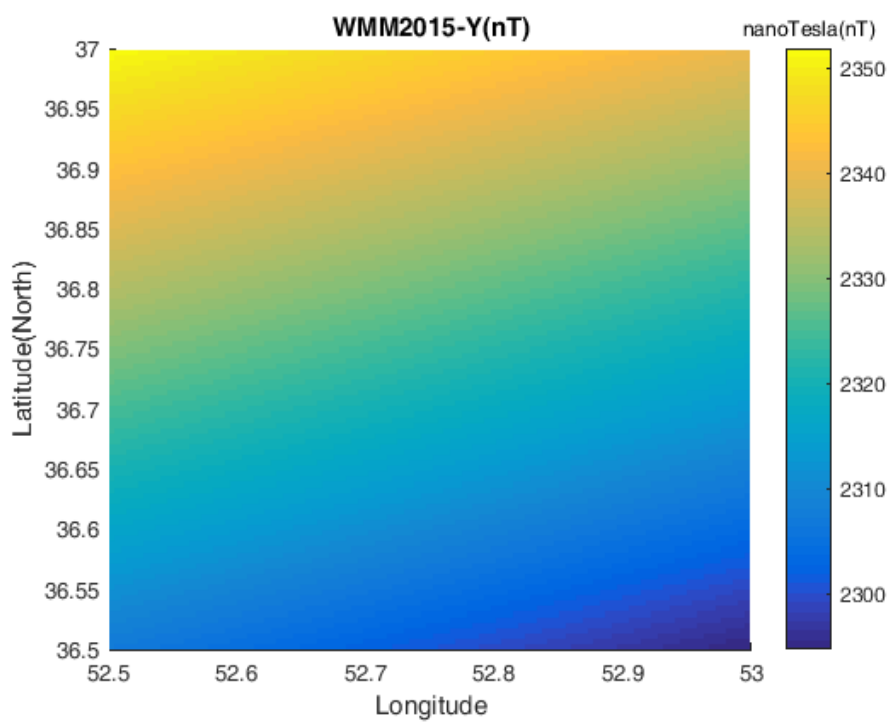
۲-۲-۳-۲- تولید نقشه‌های مدل WMM2015 در محدوده میدان تست

برای اینکه بتوان داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی MLP را تولید کرد و همچنین به منظور شبیه‌سازی سیگنال‌های سنسور مغناطیس‌سنج باید ابتدا نقشه‌های میدان مغناطیسی زمین تهیه شوند. این نقشه‌ها نشان دهنده تغییرات میدان مغناطیسی زمین در محدوده جغرافیایی تعیین شده هستند. نقشه‌های تولید شده زیر مربوط به دریای خزر در نزدیکی سواحل شهرستان بابلسر در محدوده طول جغرافیایی ۳۶.۵ الی ۳۷ درجه و عرض جغرافیایی ۵۲.۵ الی ۵۳ درجه می‌باشد. بازه تعیین شده یک منطقه مربعی شکل با قطر بیش از ۷۰ کیلومتر می‌باشد.

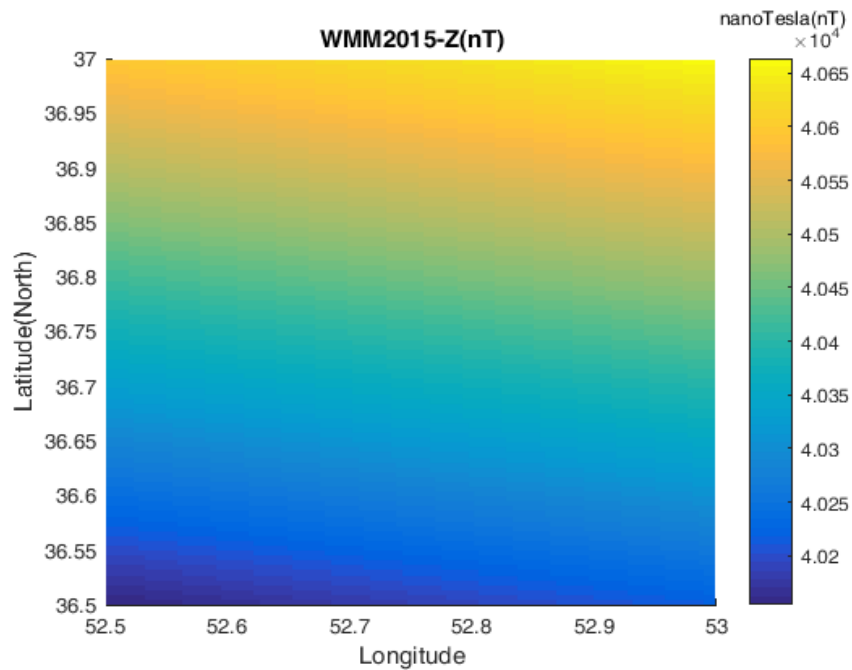
شکل‌های (۲-۴) الی (۲-۱۰) تغییرات مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست را نشان می‌دهند.



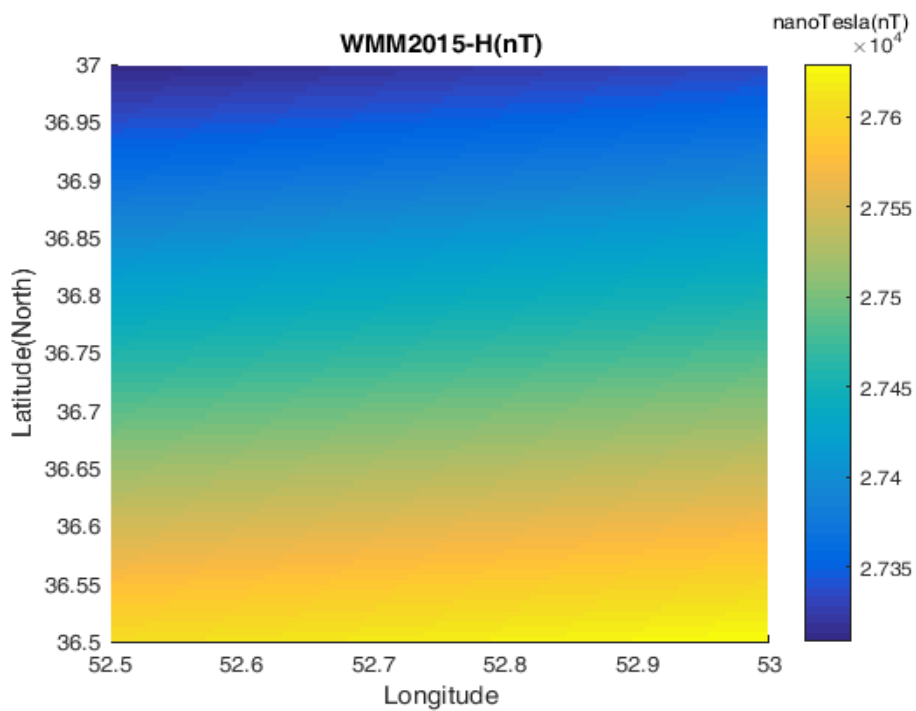
شکل (۲-۴) نقشه مولفه X میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست



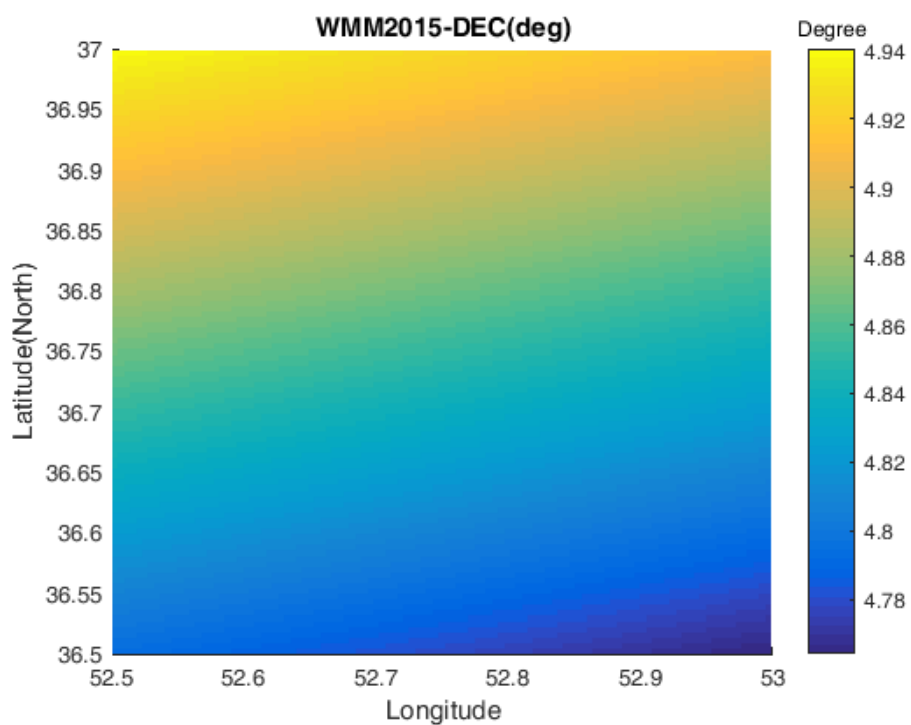
شکل (۲-۵) نقشه مولفه Y میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست



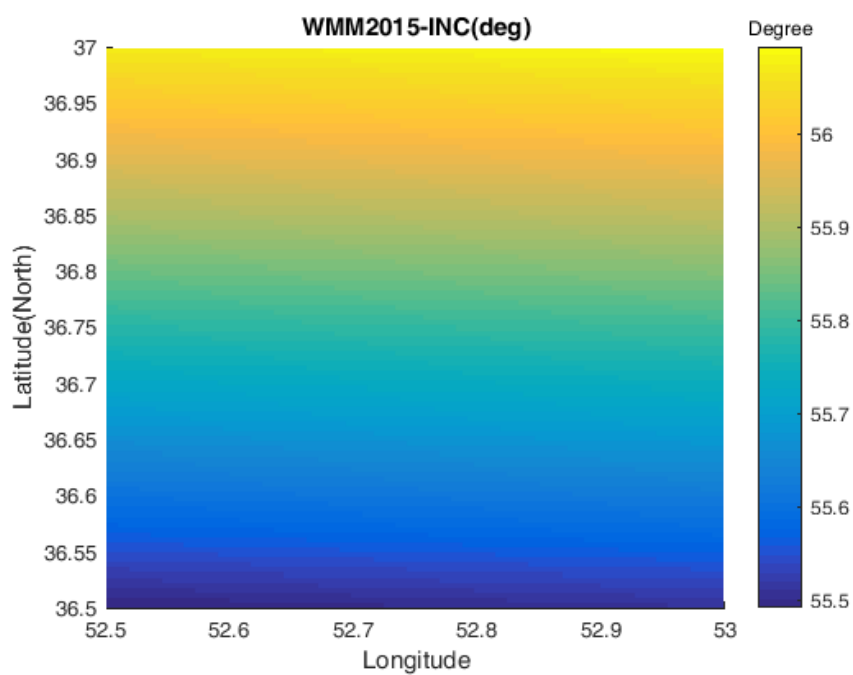
شکل(۲-۶) نقشه مولفه Z میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست



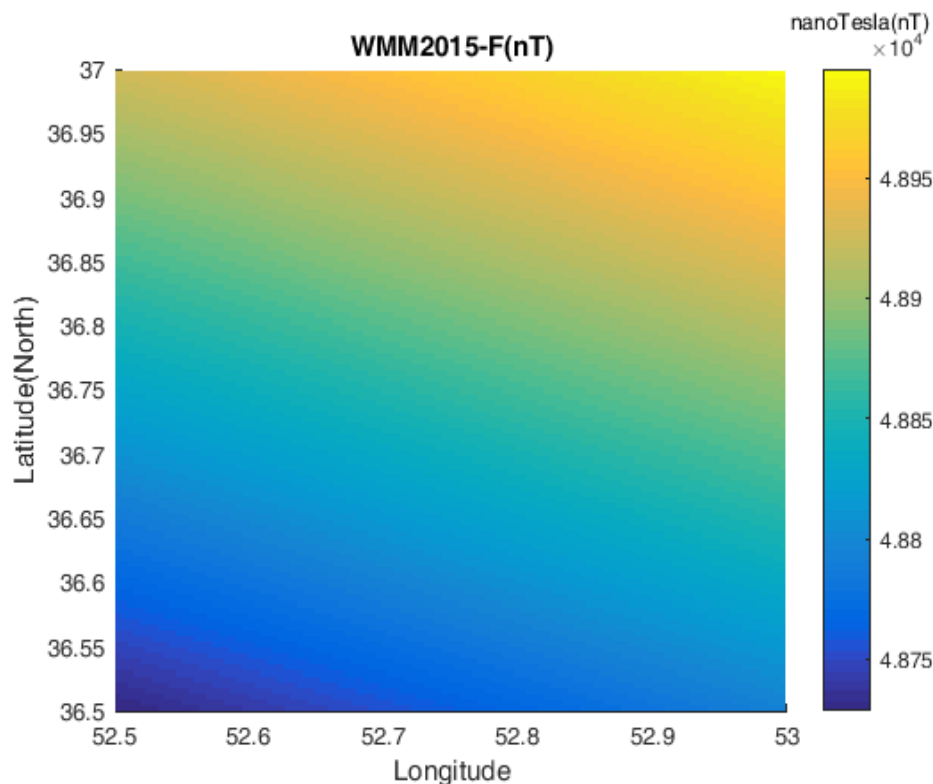
شکل(۲-۷) نقشه مولفه H میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست



شکل (۲-۸) نقشه مولفه Declination میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست



شکل (۲-۹) نقشه مولفه Inclination میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست



شکل (۲-۱۰) نقشه مولفه F میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست

۲-۲-۳- شبیه سازی داده های مغناطیس سنج برای مسیر

پس از تولید نقشه هایی که بیان کننده تغییرات مولفه های مستقل و وابسته میدان مغناطیسی زمین در منطقه مورد نظر می باشند، شبیه سازی سیگنال های سنسور مغناطیسی کار چندان دشواری نخواهد بود. به دلیل اینکه مدل سازی رفتار داخلی یک سنسور مغناطیسی خارج از حوزه این تحقیق است، برای مدل کردن سیگنال های سنسور مغناطیسی تنها از نقشه های تهیه شده استفاده شده است. در طی مسیر حرکت با شناور روی دریا^۱ توسط یک گیرنده GPS طول و عرض جغرافیایی نقاط مربوط به مسیر حرکت ثبت و ضبط می شود. سپس مقادیر داده های میدان مغناطیسی متناسب با این مسیرها با استفاده از مدل WMM2015 خوانده می شود. سپس نویز متناسب با داده های خوانده شده به آنها افزوده می شود.

به منظور ارزیابی مقاومت^۲ شبکه در مقابل نویز با استفاده از تابع AWGN^۳ در نرم افزار متلب یک نویز سفید گوسین به داده های مغناطیسی مربوط به مسیر با نسبت دامنه سیگنال به نویز 10^3 (۳۰dB)

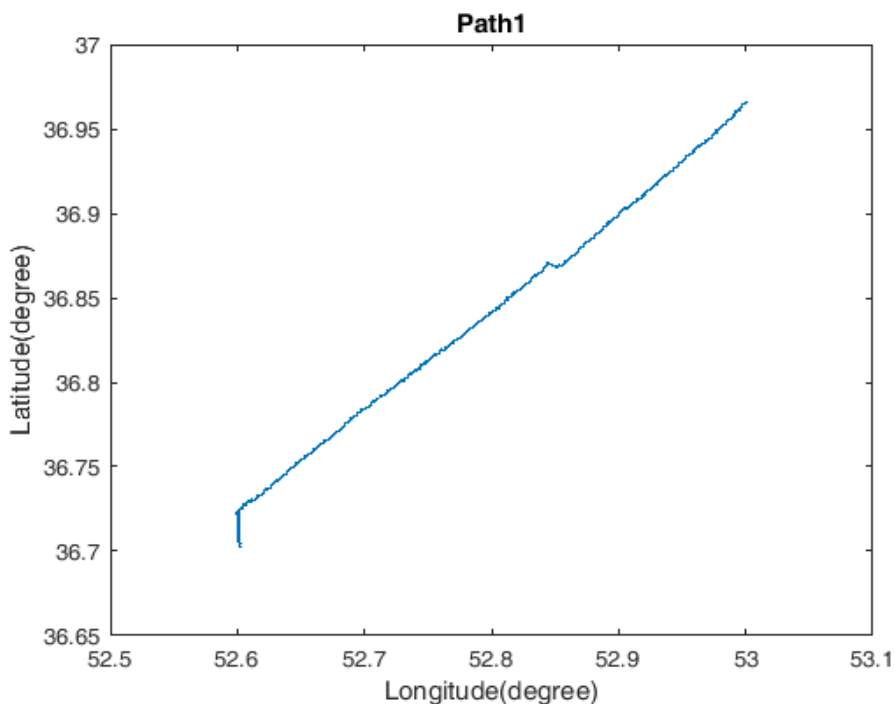
۱ مسیرهای ذکر شده مسیرهای واقعی می باشند که روی دریای خزر در نزدیکی سواحل شهرستان بابلسر طی شده اند.

2 Robustness

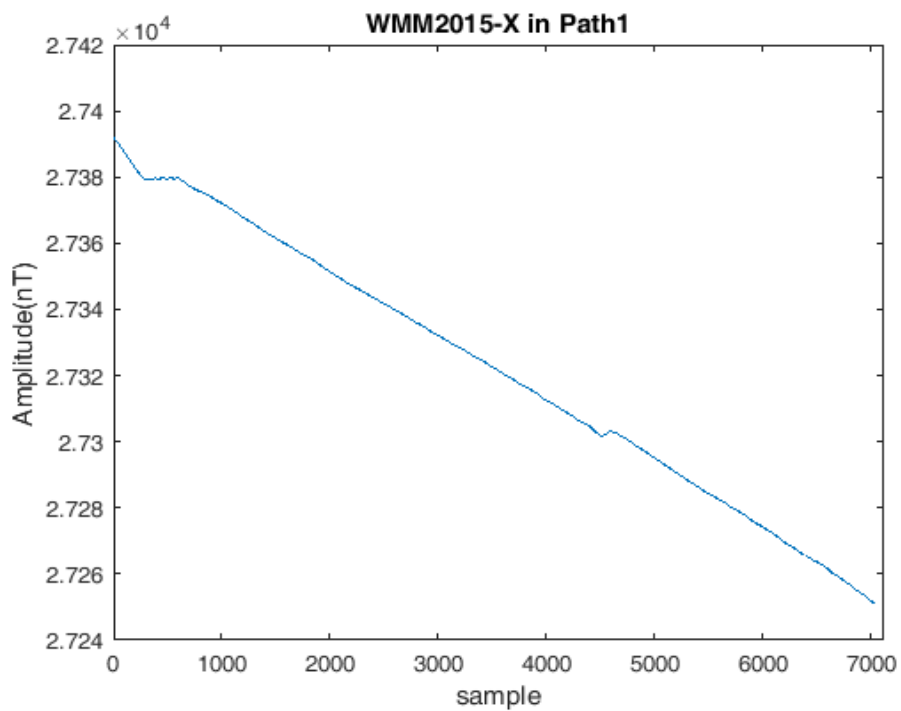
3 Add white Gaussian Noise to Signal

افزوده می‌شود. شکل (۱۱-۲) مسیر شماره یک طی شده روی دریا با استفاده از یک گیرنده GPS و شکل‌های (۱۲-۲) الی (۱۴-۲) تغییرات مولفه‌های مستقل X ، Y و Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره یک را نشان می‌دهند.

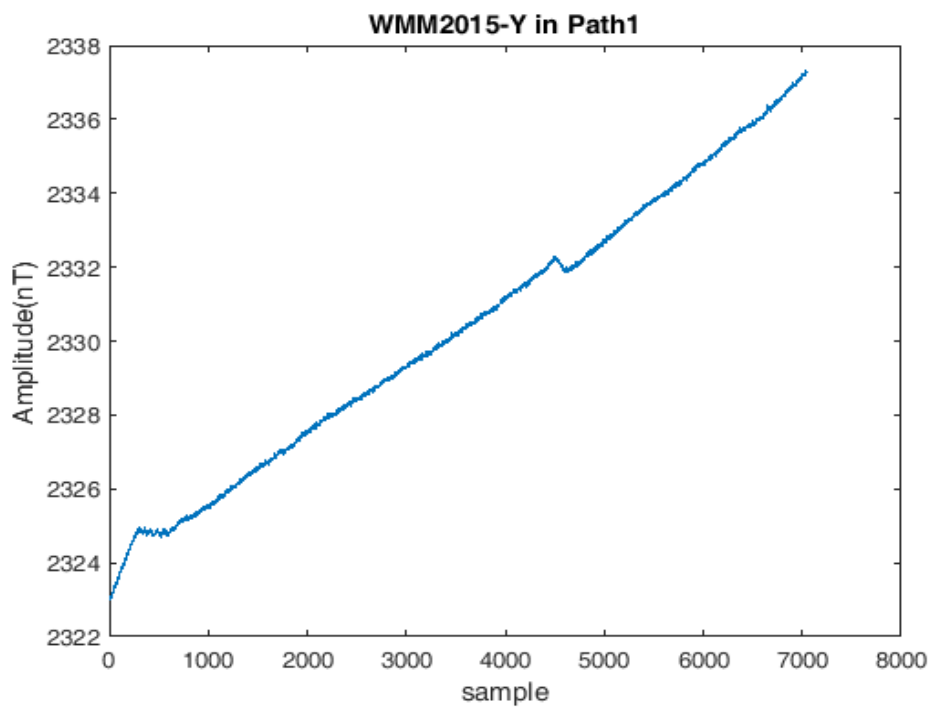
همچنین شکل (۱۵-۲) مسیر شماره دو طی شده روی دریا با استفاده از یک گیرنده GPS و شکل‌های (۱۶-۲) الی (۱۸-۲) تغییرات مولفه‌های مستقل X ، Y و Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره دو را نشان می‌دهند. در مسیر شماره دو به منظور بررسی تغییر زاویه سمت روی عملکرد سیستم تعیین موقعیت شناور با تغییرات پایی جهت مسیر خود را پیموده و در قسمتی از مسیر، چندین بار یک مسیر دایره‌ای شکل را با شعاع تقریبی کمتر از ۵۰۰ متر پیموده است. شکل (۱۹-۲) مسیر دایره‌ای طی شده روی دریا با استفاده از یک گیرنده GPS و شکل‌های (۲۰-۲) الی (۲۲-۲) تغییرات مولفه‌های مستقل X ، Y و Z میدان مغناطیسی زمین در این مسیر دایره‌ای را نشان می‌دهند.



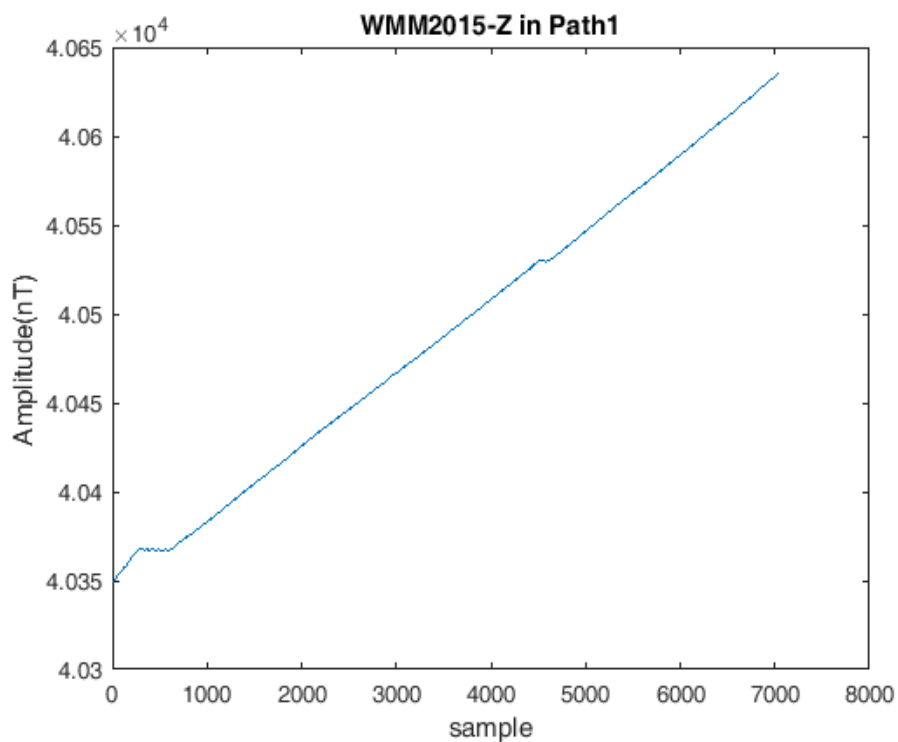
شکل (۱۱-۲) مسیر شماره یک حرکت با شناور روی دریا توسط یک گیرنده GPS



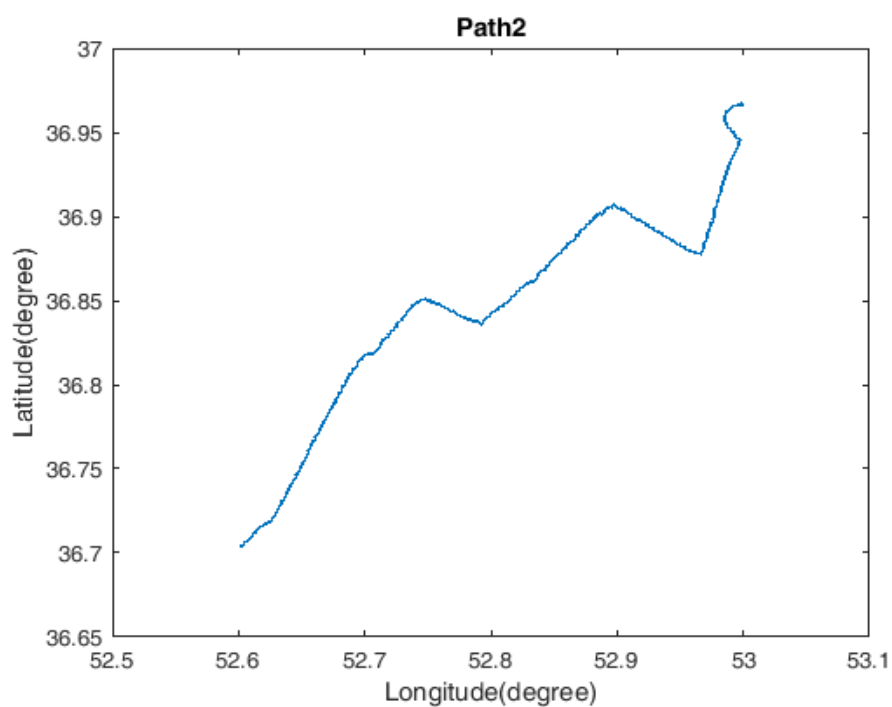
شکل (۲-۱۲) تغییرات مولفه مستقل X میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره یک



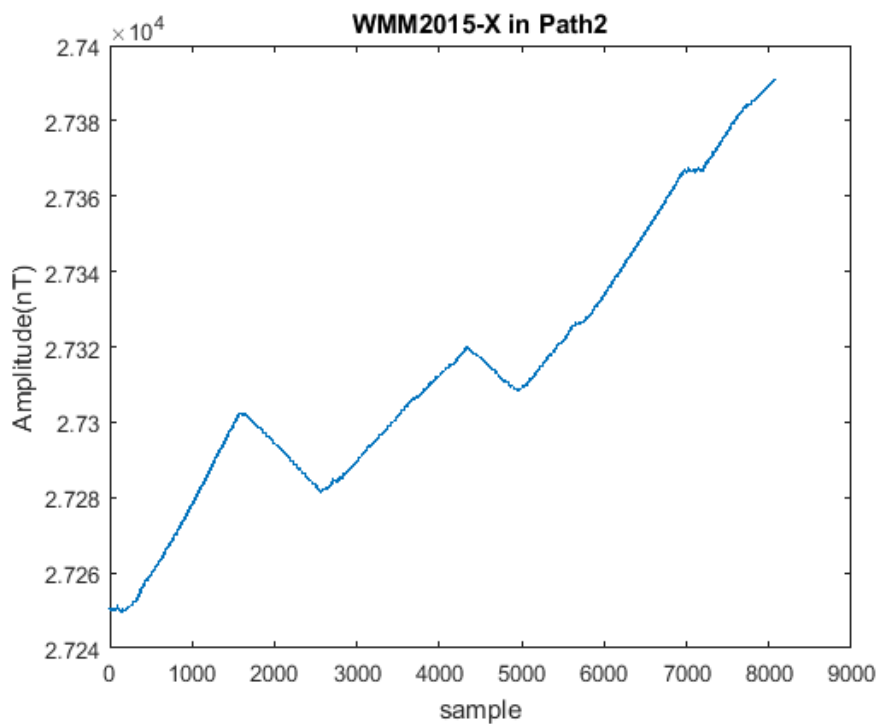
شکل (۲-۱۳) تغییرات مولفه مستقل Y میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره یک



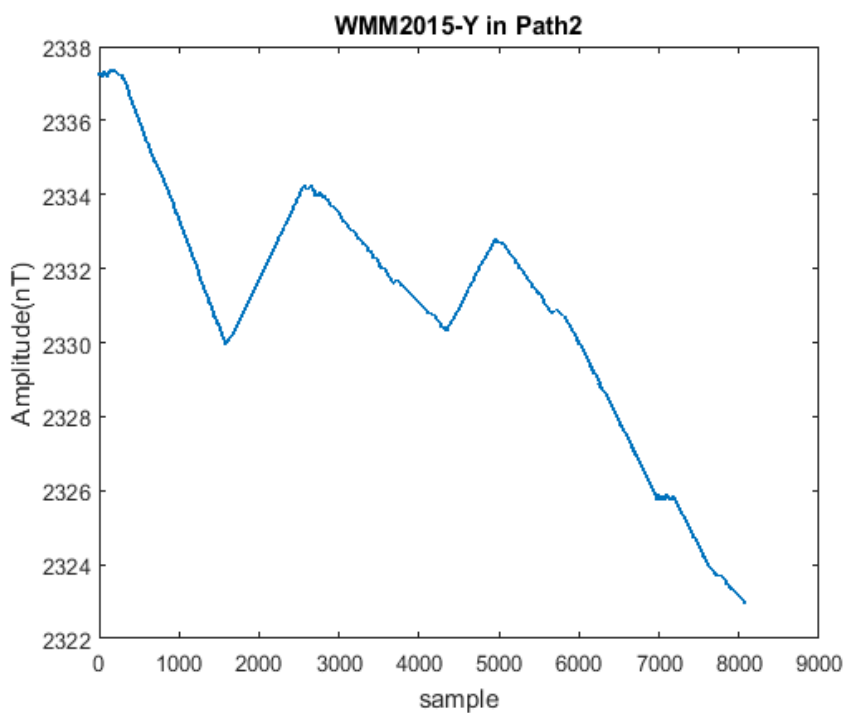
شکل (۲-۱۴) تغییرات مولفه مستقل Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره یک



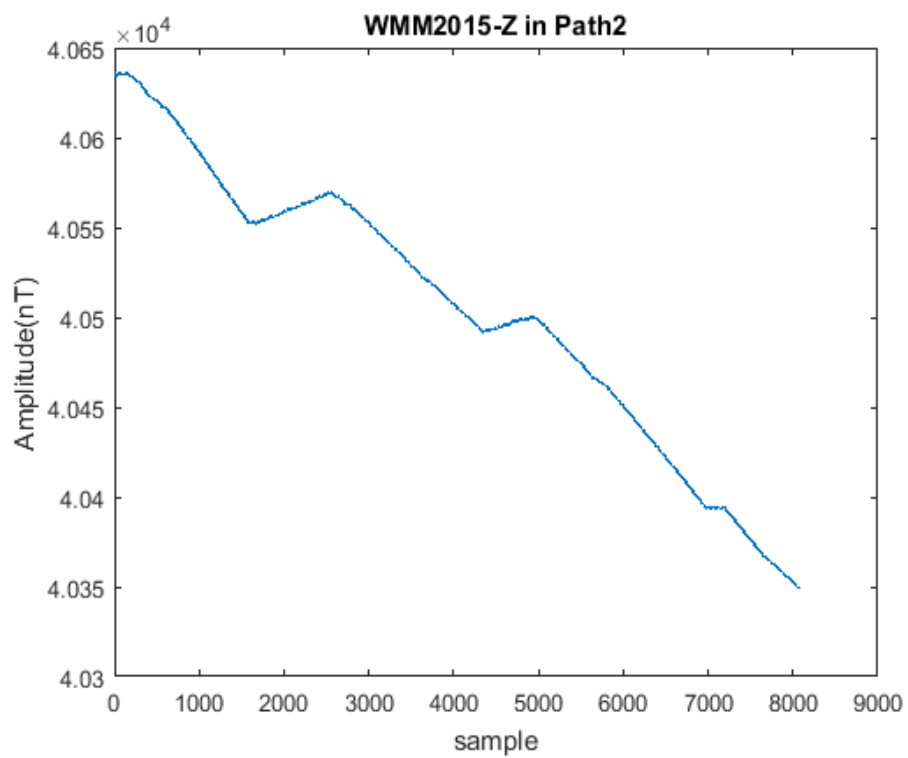
شکل (۲-۱۵) مسیر شماره دو حرکت با شناور روی دریا توسط یک گیرنده GPS



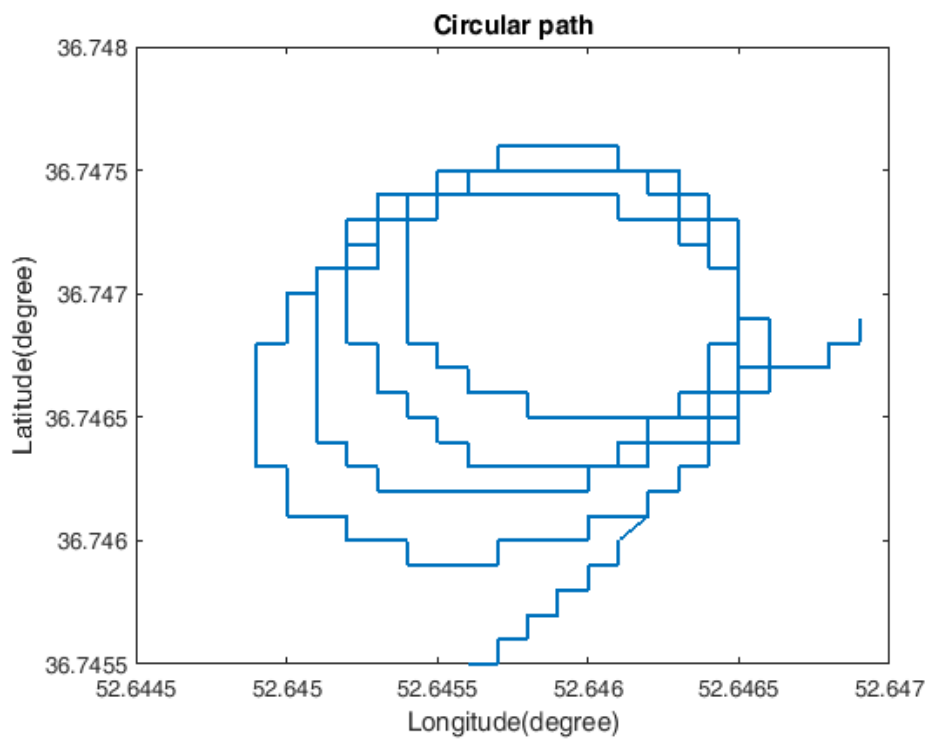
شکل (۲-۱۶) تغییرات مولفه مستقل X میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره دو



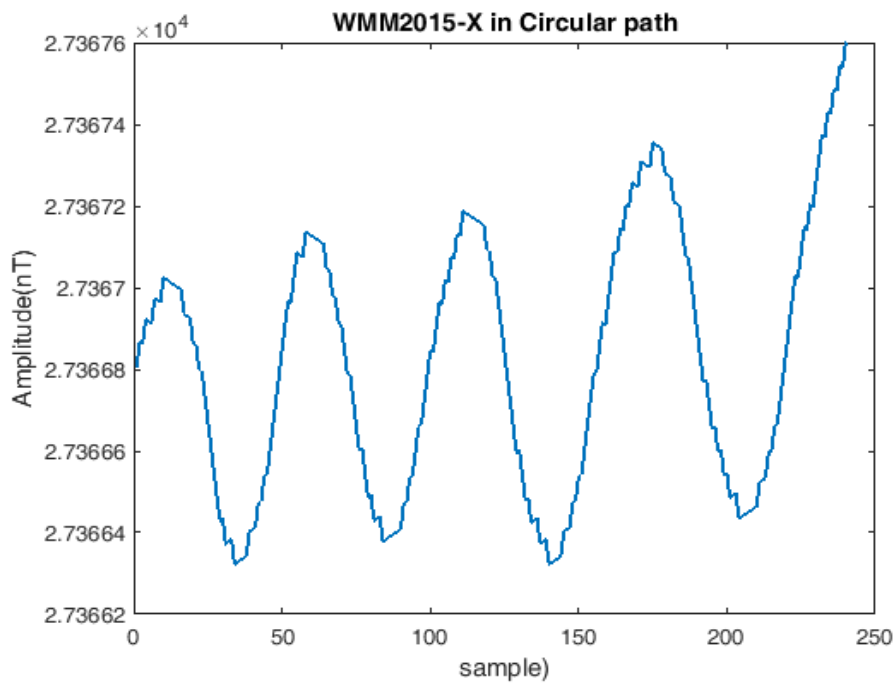
شکل (۲-۱۷) تغییرات مولفه مستقل Y میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره دو



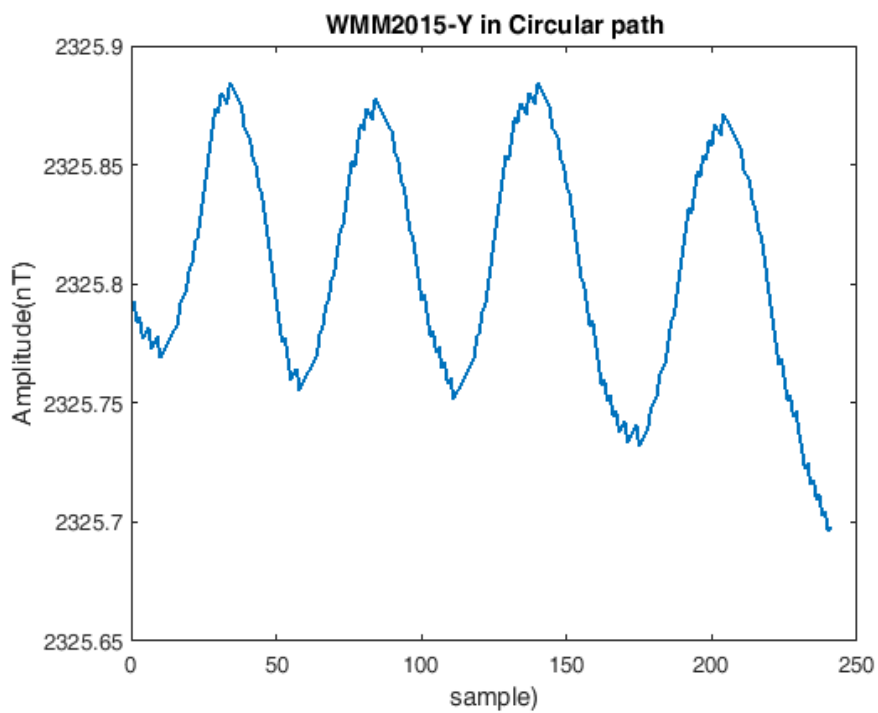
شکل (۲-۱۸) تغییرات مولفه مستقل Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر شماره دو



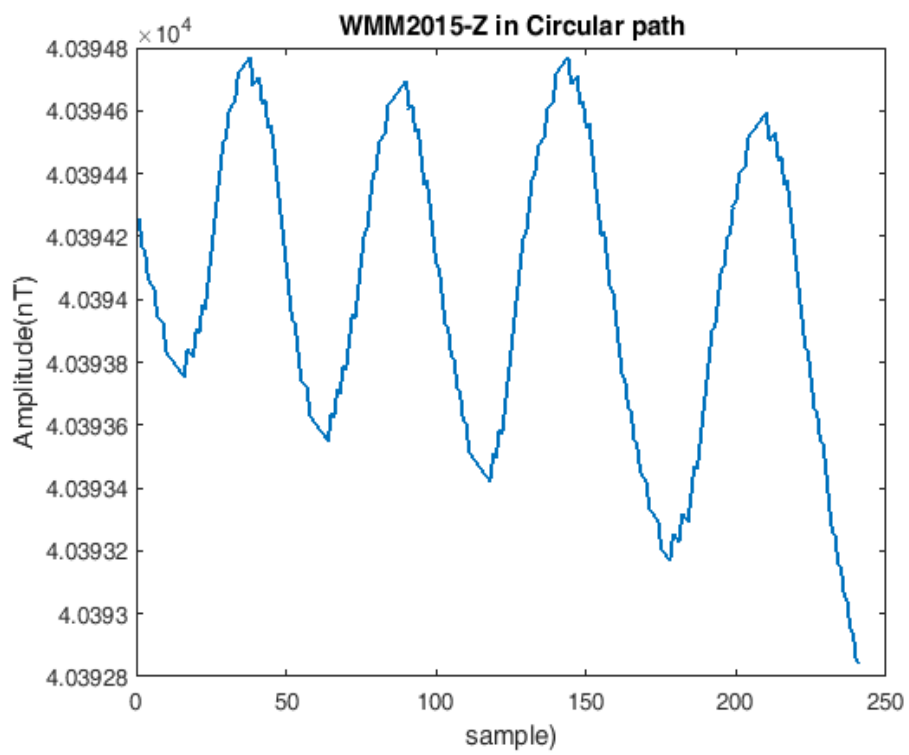
شکل (۲-۱۹) مسیر دایره‌ای شکل حرکت با شناور روی دریا توسط یک گیرنده GPS



شکل (۲-۲۰) تغییرات مولفه مستقل X میدان مغناطیسی زمین در مسیر دایره‌ای شکل



شکل (۲-۲۱) تغییرات مولفه مستقل Y میدان مغناطیسی زمین در مسیر دایره‌ای شکل



شکل (۲-۲۲) تغییرات مولفه مستقل Z میدان مغناطیسی زمین در مسیر دایره‌ای شکل

فصل ۳:

روش پیشنهادی جهت تعیین موقعیت

۳-۱- مقدمه

در فصل قبل نقشه‌های مغناطیسی مورد نیاز جهت شبیه‌سازی سیگنال‌های حسگر مغناطیسی تولید شد. این نقشه‌ها اساس کار سیستم تعیین موقعیت توسط داده‌های میدان مغناطیسی زمین می‌باشند. در این فصل روشی برای تعیین موقعیت با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی زمین معرفی می‌شود که از حیث موضوع، روشی نو در تعیین موقعیت مبتنی بر میدان مغناطیسی زمین به حساب می‌آید. اساس این روش بر پایه شناسایی یک نگاشت غیرخطی استوار است و این نگاشت در حقیقت توسط یک شبکه عصبی پرسپترون صورت خواهد گرفت و بدین ترتیب اطلاعات موقعیت به صورت تقریبی در اختیار کاربر قرار خواهد گرفت. روش کار به این صورت خواهد بود که مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین که توسط حسگر مغناطیسی اندازه‌گیری می‌شوند به یک نقشه از موقعیت جغرافیایی که شامل طول و عرض جغرافیایی می‌باشد، نگاشت داده می‌شود. هدف از ارائه این فصل مدل کردن سیستمی بر مبنای تغییرات میدان مغناطیسی زمین جهت تعیین یکتای موقعیت با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی زمین می‌باشد.

۳-۲- مدل‌سازی عصبی

هدف از مدل‌سازی، مدل کردن رفتار واقعی سیستم با توجه به یک مجموعه اطلاعات اندازه‌گیری شده از ورودی- خروجی سیستم می‌باشد. با استفاده از سیستم مدل شده کاربر می‌تواند شناختی از ویژگی‌های اصلی سیستم بدست آورده و با سیستم به درستی رفتار کند. با این وجود مسئله مدل‌سازی در مواقعی که سیستم به شدت غیرخطی و پیچیده است، مشکل خواهد بود. روش‌های کمی که مبتنی بر ریاضیات می‌باشند، سعی بر نمایش مدل دقیقی از سیستم دارند، ولی در شرایطی که سیستم پیچیده یا دارای عدم قطعیت باشد، این روش‌ها مناسب نمی‌باشند. پرفسور زاده نظریه مجموعه‌های فازی را برای مدل‌سازی مجموعه‌های با عدم قطعیت پیشنهاد کرده است. با این وجود این روش فاقد روشی معین برای تعیین تعداد قوانین فازی لازم و توابع تعلق مربوط به آنها می‌باشد و علاوه بر این از یک الگوریتم کارآمد برای تصحیح توابع تعلق فازی و در نتیجه کاهش خطای خروجی شبکه برخوردار نیست.

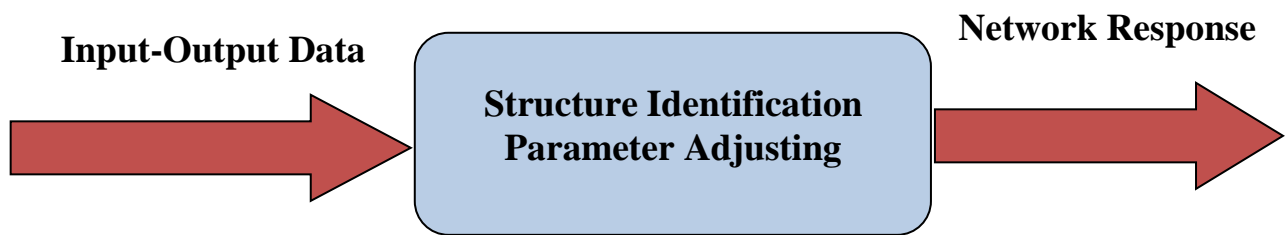
روش دیگری که برای مدل‌سازی استفاده می‌شود، مدل‌سازی بر اساس شبکه‌های عصبی می‌باشد. این روش یک تقریب زننده جامع، دارای پارامترهای کم و از دقت بالا برخوردار است. شبکه‌های

عصبی با توانایی قابل توجه خود در استنتاج نتایج از داده‌های پیچیده می‌توانند در استخراج روابط و شناسایی الگوهای مختلفی که برای انسان‌ها و کامپیوتر شناسایی آنها بسیار دشوار است استفاده شوند. علاوه بر این، یکی از ویژگی‌های شبکه‌های عصبی که باعث برتری آنها به سایر تقریب زنده‌ها می‌شود، قابلیت تعیین ساختار آنها با توجه به مجموعه اطلاعات ورودی، خروجی است [۲۳]. مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های عصبی که آنها را از دیگر سیستم‌های تخمین‌گر متمایز می‌کند عبارتند از:

- یادگیری تطبیقی: توانایی یادگیری اینکه چگونه وظایف خود را بر اساس اطلاعات داده شده به آن یا تجارب اولیه انجام دهد. در واقع این ویژگی همان قابلیت اصلاح شبکه است.
- خود سازماندهی: یک شبکه عصبی به صورت خودکار سازماندهی و ارائه پاسخ مطلوب به داده‌هایی که در طول آموزش دریافت کرده را انجام می‌دهد. به عبارت دیگر نرون‌ها با قاعده یادگیری سازگار شده و پاسخ به ورودی تغییر می‌یابد.
- سرعت محاسباتی بالا: محاسبات در شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به صورت موازی انجام گیرد و این قابلیت موجب افزایش سرعت محاسباتی شبکه می‌شود.
- تحمل خطا: با ایجاد خرابی در قسمتی از شبکه مقداری از کارایی کاهش می‌یابد ولی ساختار کلی شبکه همچنان حفظ می‌شود.
- دسته‌بندی: شبکه عصبی قادر به دسته‌بندی ورودی‌ها برای دریافت خروجی مناسب می‌باشد.
- قدرت تعمیم دهی: این ویژگی شبکه را قادر می‌سازد تا تنها با برخورد با تعداد محدودی نمونه، یک قانون کلی از آن را به دست آورده و نتایج این آموخته‌ها را به موارد مشابه تعمیم دهد [۲۳].

بنابراین برای مدل‌سازی سیستم تعیین موقعیت مبتنی بر اطلاعات حسگر مغناطیسی از روش مدل سازی عصبی استفاده شده است.

در حالت کلی، ایجاد یک مدل سیستمی عصبی برای یک تابع نامعلوم $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ بر اساس مجموعه اطلاعات، مبتنی بر دو مرحله همزمان است که در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است. یکی شناسایی ساختار و دیگری مرحله تعیین یا تنظیم پارامترهای شبکه ایجاد شده می‌باشد. در مرحله شناسایی ساختار تعداد لایه‌های شبکه و همچنین تعداد نرون‌های هر لایه با توجه به مجموعه اطلاعات ورودی - خروجی استخراج می‌شود. سپس برای دست یافتن به یک سیستم مدل‌سازی عصبی، توسط یکی از الگوریتم‌های آموزش شبکه عصبی پارامترها تنظیم می‌شوند.



شکل (۱-۳) مدل سازی عصبی

در این تحقیق روش جدیدی برای تعیین موقعیت با استفاده از میدان مغناطیسی زمین پیشنهاد شده است. در مرحله تعیین ساختار یک شبکه عصبی پرسپترون دو لایه ایجاد شده و تعداد نرون های لایه مخفی آن با توجه به مجموعه اطلاعات ورودی - خروجی توسط یک الگوریتم بهینه ساز ساده بدست آمده است. سپس در مرحله شناسایی پارامترها، پارامترهای شبکه ایجاد شده توسط دو الگوریتم بهینه سازی متفاوت که در ادامه تشریح خواهند شد، تنظیم شده اند.

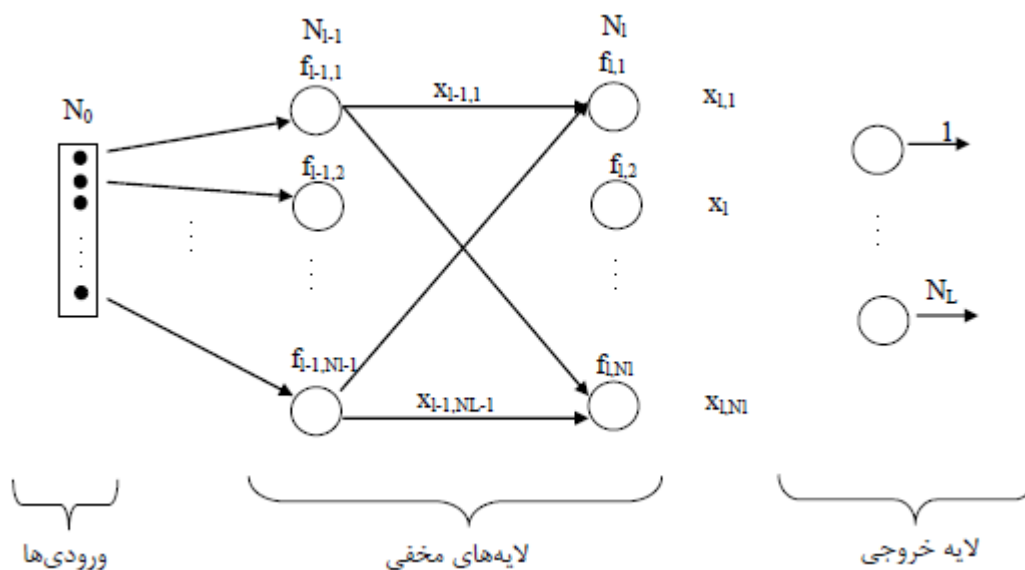
۳-۳- ساختار شبکه عصبی پرسپترون

یک شبکه عصبی پرسپترون یک شبکه چند لایه می باشد که خروجی نرون i ام از لایه l ام به صورت زیر بیان می شود [۲۴]:

$$x_{l,i} = f_{l,i}(x_{l-1,1}, x_{l-1,2}, x_{l-1,3}, \dots, x_{l-1,N_{l-1}}, \gamma, \beta) \quad (1-3)$$

که در آن تابع فعال ساز نرون، $x_{L-1,j}$ خروجی نرون j ام از لایه $l-1$ ام و γ, β بردار پارامترهای تنظیم می باشند.

ساختار شبکه عصبی پرسپترون در شکل (۲-۳) نشان داده شده است که در آن N_l تعداد نرون های لایه l ام، N_0 تعداد ورودی ها و N_L تعداد خروجی هاست. عملکرد شبکه در ادامه تشریح خواهد شد.



شکل (۲-۳) ساختار یک شبکه عصبی از نوع پرسپترون

یک شبکه عصبی شامل اجزای سازنده نرون‌ها و وزن‌ها می‌باشد. رفتار شبکه نیز وابسته به ارتباط بین اعضا است. در حالت کلی در شبکه عصبی از نوع پرسپترون سه نوع لایه نرونی وجود دارد:

لایه صفر یا ورودی: تعداد ورودی شبکه عصبی برابر N_0 است و در واقع این لایه همان اطلاعات خامی است که شبکه را تغذیه می‌کند.

لایه‌های پنهان یا میانی: عملکرد یک لایه پنهان به وسیله ورودی‌ها، وزن بین لایه‌ها، لایه پنهان قبلی و تابع فعال ساز مربوط به نرون‌های آن لایه تعیین می‌شود. بنابراین خروجی نرون i ام از لایه l ام برابر است با:

$$x_{l,i} = f_{l,i} \left(\sum_{j=1}^{N_{l-1}} w_{ij} \left(\dots \left(\sum_{k=1}^{N_0} w_{jk} (x_k) \right) \right) \right) \quad (2-3)$$

که در آن w_{ij} وزن ارتباطی بین نرون i ام از لایه l ام با نرون j ام از لایه $l-1$ ام می‌باشد. لایه خروجی: عملکرد واحد خروجی بسته به فعالیت لایه‌های پنهان و وزن ارتباطی بین لایه‌ها و خروجی تعیین می‌گردد. تعداد نرون‌های لایه خروجی برابر با تعداد خروجی داده‌های خام آموزشی می‌باشد.

بخش بعدی به چگونگی تعیین ساختار شبکه می‌پردازد.

۳-۴- تعیین ساختار شبکه

همچنان که قبلاً نیز بیان شد ایجاد یک شبکه عصبی شامل دو مرحله تعیین ساختار اولیه و تنظیم پارامترهای شبکه می‌باشد. تعداد لایه‌های مخفی و همچنین تعداد نرون‌های موجود در هر لایه مخفی یک موضوع حیاتی در پیچیدگی یک شبکه عصبی است و نقش مهمی در دقت تقریب‌زنی آن ایفا می‌کند. با توجه به قضیه «توانایی تقریب MLP» یک شبکه پرسپترون دو لایه با هر تابع فعال‌ساز دلخواه در لایه مخفی می‌تواند هر تابع پیوسته را تقریب بزند [۲۴]. بنابراین به منظور سادگی کار و همچنین افزایش سرعت یادگیری شبکه تعداد لایه‌های مخفی یک در نظر گرفته شده است. برای تعیین تعداد نرون‌های لایه مخفی نیز تاکنون روش‌های زیادی پیشنهاد شده است. می‌توان با سعی و خطا و همچنین دانش قبلی از مجموعه اطلاعات، تعداد نرون‌ها را انتخاب کرد. در این پایان‌نامه به منظور تعیین تعداد نرون‌های لایه مخفی با توجه به مجموعه داده‌های ورودی - خروجی از یک الگوریتم به شرح زیر استفاده شده است: بخش پیش رو به معرفی الگوریتم پرداخته است:

۳-۴-۱- الگوریتم تعیین ساختار

هدف از بکارگیری این الگوریتم تعیین تعداد بهینه نرون‌های لایه مخفی شبکه عصبی پرسپترون می‌باشد. بر اساس این الگوریتم تعداد نرون‌های لایه مخفی توسط یک حلقه تکرار تعیین می‌گردد. بر پایه این الگوریتم فرض می‌شود که تعداد نرون‌های لایه مخفی برابر N_1 می‌باشد و سپس به مرحله شناسایی پرداخته می‌شود. اگر در مرحله شناسایی پارامترهای مورد نظر به صورت بهینه تنظیم شده باشند و پاسخ‌های حاصل شده مطلوب کاربر باشند N_1 تعداد نرون‌های بهینه لایه مخفی شبکه عصبی پرسپترون می‌باشد در غیر این صورت این عدد مناسب نبوده و الگوریتم تعیین ساختار دوباره اجرا خواهد. این حلقه تکرار تا مرحله تنظیم مناسب پارامترهای شبکه در مرحله شناسایی ادامه خواهد یافت. جزئیات این الگوریتم در ادامه تشریح شده است:

۱- مقدار دهی اولیه: $N_1=1$ به عنوان تعداد نرون‌های لایه مخفی در نظر گرفته می‌شود.

۲- تنظیم پارامترها: تنظیم بهینه پارامترها را به کمینه‌سازی تابع معیار $J(\theta)$ وابسته می‌کنیم:

$$J(\theta) = \|E^2(\theta)\| \quad (3-3)$$

که در آن $\|E\|$ اختلاف بین داده آموزشی و خروجی شبکه است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Network error} = \|E\| = \|\text{Pred} - \text{Req}\| \quad (4-3)$$

که Pred^1 خروجی شبکه و Req^2 داده‌های آموزشی می‌باشند [24].

همچنین θ نماد پارامترهای قابل تنظیم شبکه می‌باشد.

۳- جابجایی یا افزایش تعداد نرون‌های لایه مخفی: اگر خطای شبکه از یک مقدار مطلوبی کمتر

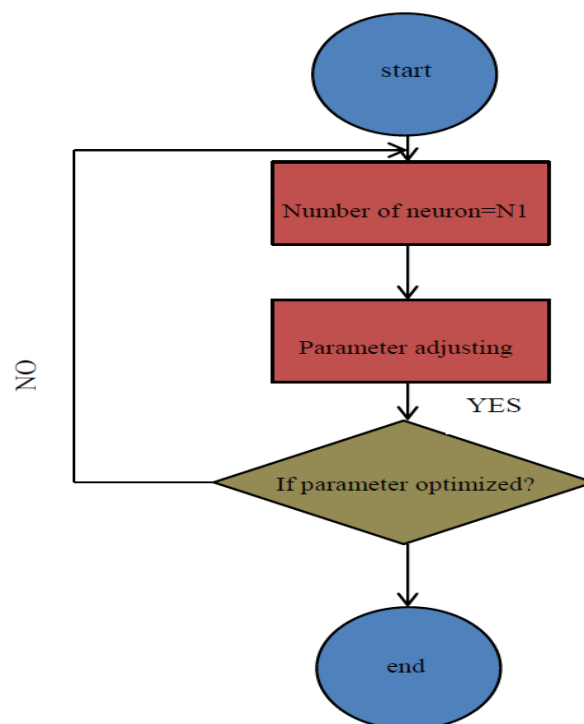
باشد یعنی

$$\text{Network error} < \alpha \quad (5-3)$$

در این صورت نرون جدید به تعداد نرون‌های لایه مخفی اضافه نخواهد شد و این تعداد نرون مناسب

شبکه عصبی می‌باشد، در غیر اینصورت الگوریتم به گام شماره یک بازخواهد گشت. شکل (۳-۳)

بلوک دیاگرام مربوط به الگوریتم تعیین ساختار را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳) بلوک دیاگرام الگوریتم تعیین ساختار شبکه عصبی پرسپترون

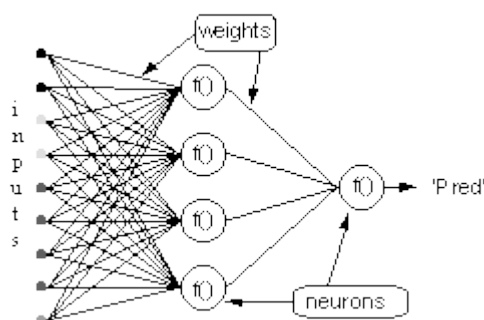
1 Prediction

2 Requirement

۳-۵- تنظیم پارامترهای شبکه^۱

همچنان که قبلا نیز بیان شد ایجاد یک شبکه عصبی در دو مرحله همزمان انجام می‌گیرد. مرحله اول تعیین ساختار شبکه و مرحله دوم تنظیم پارامترهای شبکه می‌باشد. در بخش پیشین با استفاده از یک الگوریتم ساده اما کارآمد به تعیین تعداد بهینه نرون‌های لایه مخفی یعنی ساختار شبکه پرداخته شده. در بخش پیش رو نیز مرحله دوم یعنی تنظیم پارامترهای شبکه با استفاده از روش آموزش پس انتشار خطای با سرپرست و الگوریتم SD و روش آموزش مختلط تشریح خواهد شد. در این مرحله داده‌های آموزشی قبل از اعمال به شبکه در بازه [۱-۱] نرمالیزه شده‌اند. همچنین با توجه به اینکه داده‌های آموزشی غیرخطی بوده ولی پیچیدگی چندانی ندارند تابع فعال‌ساز لایه مخفی \tanh و تابع فعال‌ساز لایه خروجی خطی در نظر گرفته شده‌اند.

لازم به ذکر است در روش‌های آموزش با سرپرست، شبکه دو مرحله آموزش و آزمایش را می‌پیماید. شبکه نشان داده شده در شکل (۳-۴) با یک لایه مخفی و یک نرون خروجی را فرض کنید. وقتی بردار ورودی داده‌های آموزشی به شبکه اعمال می‌گردد، برای وزن‌های اولیه تنظیم شده، شبکه خروجی $Pred$ را می‌دهد.



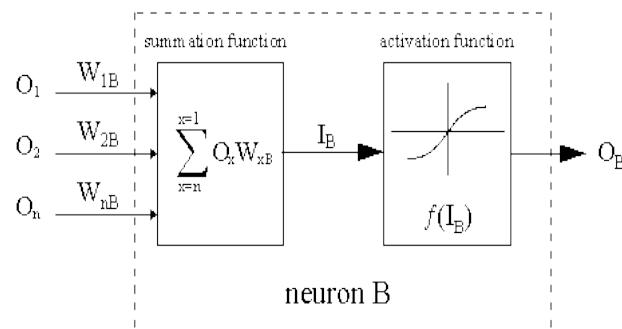
شکل (۳-۴) شبکه عصبی از نوع پرسپترون با یک لایه مخفی و یک نرون خروجی

هدف نهایی در یک روش آموزش با سرپرست تنظیم بهینه وزن‌های شبکه است، به طوری که اختلاف بین خروجی $Pred$ شبکه و خروجی آموزشی واقعی Req کاهش یابد. این موضوع نیازمند الگوریتمی است که قدرمطلق یا همان مربع خطا را کم کند. همچنان که در رابطه (۳-۴) بیان شد خطا یا همان اختلاف بین خروجی شبکه و داده آموزشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Network error} = \|E\| = \|Pred - Req\|$$

^۱ بیشتر روابط و مطالب این بخش از دو مرجع [۲۵ و ۲۶] آورده شده است.

الگوریتم باید وزن‌ها را طوری تنظیم کند تا $\|E\|^2$ کمینه شود. پس انتشار خطا چنین الگوریتمی است، یعنی به منظور کمینه‌سازی گرادیان $\|E\|^2$ به شبکه اعمال می‌شود. به منظور کمینه کردن $\|E\|^2$ باید حساسیت آن نسبت به هر کدام از وزن‌ها محاسبه شود. به عبارت دیگر باید مشخص شود تغییر هر پارامتر وزنی چه تاثیری روی $\|E\|^2$ دارد. اگر این مشخص شود وزن‌ها می‌توانند در جهتی تغییر یابند که قدرمطلق خطا کم شود. نمادگذاری قانون پس‌انتشار خطا که در ادامه شرح داده خواهد شد مبتنی بر بلوک دیاگرام شکل (۳-۵) خواهد بود.



شکل (۳-۵) بلوک دیاگرام نرون B

خط‌چین احاطه کننده شکل (۳-۵)، نرون B را نشان می‌دهد که می‌تواند یک نرون مخفی یا خروجی باشد. خروجی نرون‌های لایه قبلی (O_1, O_2, \dots, O_n) ورودی‌های نرون B را فراهم می‌کنند. پرواضح است که اگر نرون B در لایه مخفی باشد، این مقادیر همان بردار ورودی شبکه می‌باشند. این خروجی‌ها به ترتیب در وزن‌های مربوط به خود (W_{1B}, \dots, W_{nB}) ضرب شده، سپس تابع جمع‌کننده همه حاصل ضرب‌ها را باهم جمع می‌کند تا ورودی نرون B یا همان I_B فراهم شود. این ورودی توسط تابع فعال‌ساز^۱ نرون B پردازش می‌شود. خروجی $f(I_B)$ یا O_B همان خروجی نرون B می‌باشد. در ادامه به منظور روشن شدن موضوع نرون شماره یک، نرون A نامیده می‌شود و وزن بین نرون A و B با W_{AB} نمایش داده می‌شود.

۳-۵-۱- الگوریتم گرادیان نزولی

رابطه استفاده شده برای به روز رسانی پارامتر W_{AB} به صورت زیر است:

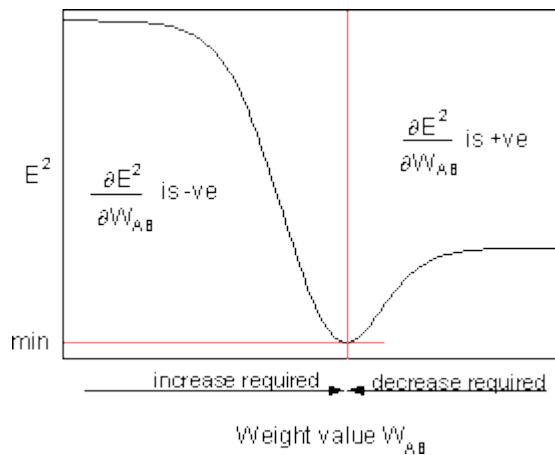
^۱ Activation Function

$$W_{AB(new)} = W_{AB(old)} - \eta \frac{\partial J(\theta)}{\partial W_{AB}} \quad (6-3)$$

با جایگذاری رابطه (3-3) در رابطه (6-3) داریم:

$$W_{AB(new)} = W_{AB(old)} - \eta \frac{\partial \|E\|^2}{\partial W_{AB}} \quad (7-3)$$

که در آن پارامتر ارتباطی لایه A و B، η نرخ یادگیری یا گام پیشروی و $\frac{\partial \|E\|^2}{\partial W_{AB}}$ حساسیت خطای $\|E\|$ به پارامتر W_{AB} را نشان می‌دهد و جهت جست‌وجو در فضای مربوط به پارامتر را به منظور دستیابی به وزن جدید $W_{AB(new)}$ که در شکل (6-3) نشان داده شده است را تعیین می‌کند [24, 25].



شکل (6-3) به منظور کمینه‌سازی E^2 ، قانون دلتا جهت تغییر وزن مورد نیاز را فراهم می‌کند

با نوشتن رابطه (7-3) به صورت زنجیره‌ای داریم:

$$\frac{\partial \|E\|^2}{\partial W_{AB}} = \frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_B} \frac{\partial I_B}{\partial W_{AB}} \quad (8-3)$$

و

$$\frac{\partial I_B}{\partial W_{AB}} = \frac{\partial \sum_{x=1}^{x=n} Q_x W_{AB}}{\partial W_{AB}} = \frac{\partial (O_A W_{AB})}{\partial W_{AB}} + \frac{\partial \sum_{x=2}^{x=n} Q_x W_{AB}}{\partial W_{AB}} = O_A \quad (9-3)$$

از این رو بقیه ورودی‌ها به نرون B هیچ وابستگی به پارامتر وزنی W_{AB} ندارند. بنابراین با توجه به روابط (۸-۳) و (۹-۳) رابطه (۷-۳) به صورت زیر درمی‌آید:

$$W_{AB(new)} = W_{AB(old)} - \eta \frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_B} O_A \quad (۱۰-۳)$$

و تغییر وزن W_{AB} به حساسیت مربع خطا یعنی $\|E\|^2$ به ورودی I_B یعنی ورودی سیگنال O_A به نرون B وابسته است.

حال دو حالت ممکن را برای نرون B بررسی می‌کنیم:

۱- B یک نرون خروجی می‌باشد:

با فرض این حالت، تغییر در مربع خطا ناشی از تنظیم W_{AB} به سادگی موجب تغییر در مربع خطای خروجی نرون B می‌شود.

از آنجایی که B یک نرون خروجی می‌باشد، تغییر در مربع خطا ناشی از تنظیم W_{AB} به سادگی موجب تغییر در مربع خطای خروجی B می‌شود.

$$\Delta \|E\|^2 = \Delta (\text{Pred} - \text{Req})^2 \quad (۱۱-۳)$$

و

$$\frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_B} = 2(\text{Pred} - \text{Req}) \frac{\partial \text{Pred}}{\partial I_B} = 2\|E\| \frac{\partial f(I_B)}{\partial I_B} = 2\|E\| f'(I_B) \quad (۱۲-۳)$$

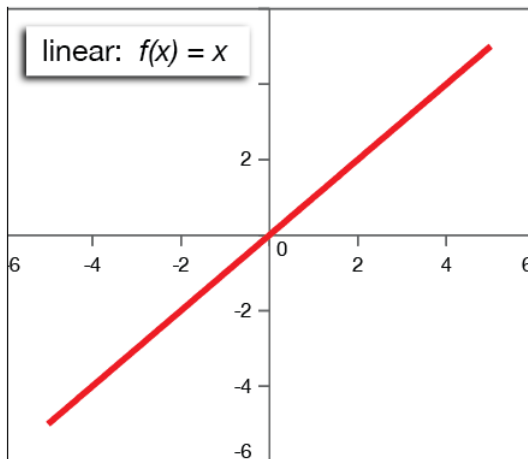
با ترکیب معادلات (۱۰-۳) و (۱۲-۳) داریم:

$$W_{AB(new)} = W_{AB(old)} - \eta O_A 2\|E\| f'(I_B) \quad (۱۳-۳)$$

با توجه به اینکه تابع فعال‌ساز لایه خروجی یک تابع خطی به صورت شکل (۷-۳) می‌باشد داریم:

$$f(x) = x \Rightarrow f'(x) = 1 \quad (۱۴-۳)$$

$f'(x)$ مشتق تابع $f(x)$ نسبت به آرگومان x می‌باشد.



شکل (۷-۳) تابع خطی - تابع فعال ساز لایه خروجی

در نتیجه رابطه (۳-۱۳) برای مواقعی که تابع فعال ساز لایه خروجی به صورت خطی باشد به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$W_{AB(new)} = W_{AB(old)} - \eta O_A 2\|E\| \quad (۳-۱۴)$$

۲- B یک نرون در لایه مخفی می باشد:

در این صورت $\frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_B}$ به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_B} = \frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_o} \frac{\partial I_o}{\partial O_B} \frac{\partial O_B}{\partial I_B} \quad (۳-۱۵)$$

در رابطه فوق اندیس ۰ نشان دهنده نرون خروجی می باشد.
با فرض اینکه $f(\cdot)$ تابع فعال ساز نرون خروجی B باش داریم:

$$\frac{\partial O_B}{\partial I_B} = \frac{\partial f(I_B)}{\partial I_B} = f'(I_B) \quad (۳-۱۶)$$

و

$$\frac{\partial I_o}{\partial O_B} = \frac{\partial \sum_p O_p W_{pO}}{\partial O_B} \quad (۳-۱۷)$$

که p نشانگر همه نرون ها از جمله نرون B است که که سیگنال ورودی نرون خروجی را فراهم می کنند.
با بسط سمت راست رابطه (۳-۱۷) داریم:

$$\frac{\partial \sum_p O_p W_{pO}}{\partial O_B} = \frac{\partial O_B W_{BO}}{\partial O_B} + \frac{\partial \sum_{p \neq B} O_p W_{pO}}{\partial O_B} = W_{BO} \quad (18-3)$$

از آنجایی که وزن‌های مربوط به سایر نرون‌ها ($W_{pO}, p \neq B$) وابستگی به O_B ندارند با جایگذاری روابط (3-16) و (3-18) در رابطه (3-15) این رابطه به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_B} = \frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_O} W_{BO} f'(I_B) \quad (19-3)$$

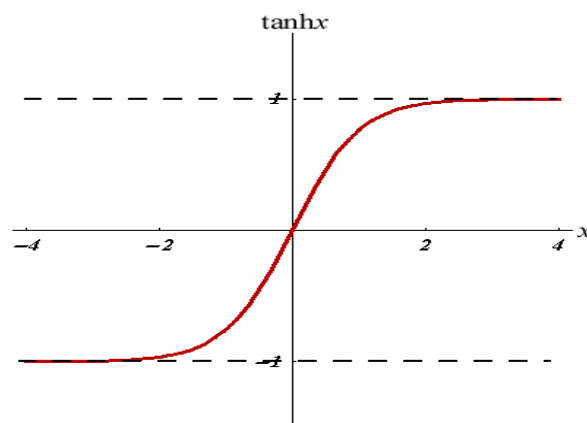
بنابراین $\frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_B}$ به صورت تابعی از $\frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_O}$ بیان می‌شود.

با جایگذاری رابطه (3-19) در رابطه (3-10) این رابطه به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$W_{AB(new)} = W_{AB(old)} - \eta \frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_O} W_{BO} f'(I_B) O_A \quad (20-3)$$

با توجه به اینکه تابع فعال‌ساز لایه مخفی تابع \tanh به صورت شکل (3-8) می‌باشد داریم:

$$f(x) = \tanh(x) \Rightarrow f'(x) = 1 - x^2 \quad (21-3)$$



شکل (3-8) تابع \tanh - تابع فعال‌ساز لایه مخفی

در نتیجه رابطه (3-21) برای مواقعی که تابع فعال‌ساز لایه خروجی به صورت \tanh باشد به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$W_{AB(new)} = W_{AB(old)} - \eta \frac{\partial \|E\|^2}{\partial I_o} W_{BO} (1-x^2) O_A \quad (22-3)$$

لازم به ذکر است در صورتی که شبکه عصبی در لایه خروجی خود بیش از یک نرون داشته باشد، الگوریتم کمینه‌سازی گرادیان نزولی بر روی مجموع مربعات خطای همه نرون‌های لایه خروجی اعمال می‌شود. همچنین الگوریتم‌های دیگری نیز وجود دارند که به منظور افزایش سرعت الگوریتم اصلی طراحی شده‌اند. این الگوریتم‌ها در مراجع [۲۴، ۲۵] تشریح شده‌اند.

۳-۵-۲- روش آموزش مختلط

در صورتی که تابع هدف نسبت به تعدادی از پارامترها خطی و نسبت به تعدادی دیگر غیرخطی باشد از روش آموزش مختلط استفاده می‌کنیم. در این روش از روش آموزش کمترین مربعات خطا^۱ برای به‌روزرسانی پارامترهای خطی و از روش‌های آموزش برپایه مشتق نظیر گرادیان نزولی برای تنظیم پارامترهای غیرخطی استفاده می‌کنند [۲۴].

همانند روش آموزش قبل با توجه به رابطه (۳-۴) فرض می‌کنیم اختلاف بین خروجی شبکه و داده-های آموزشی به صورت زیر تعریف شود:

$$\text{Network error} = \|E\| = \|\text{Pred} - \text{Req}\|$$

با توجه به اینکه تابع فعال‌ساز لایه خروجی خطی است، در نتیجه تابع هدف نسبت به وزن‌های متصل‌کننده لایه مخفی به لایه خروجی خطی خواهد بود. بنابراین این وزن‌ها با استفاده از روش آموزش کمترین مربعات خطا تنظیم خواهند شد:

$$\theta = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T \cdot \text{Req} \quad (23-3)$$

که θ پارامترهای خطی قابل تنظیم، Req داده‌های آموزشی خروجی و ϕ ماتریس مشتق تابع هدف نسبت به پارامترهای خطی قابل تنظیم است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi = \left[\frac{\partial F}{\partial \theta_1} \quad \frac{\partial F}{\partial \theta_2} \quad \frac{\partial F}{\partial \theta_3} \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial \theta_n} \right] \quad (24-3)$$

¹ Least Squares Error(LSE)

سایر پارامترهای شبکه نیز با استفاده از روش‌های آموزش برپایه مشتق تنظیم خواهند شد.

مراحل روش آموزش مختلط به صورت زیر است:

۱- انتخاب مقادیر اولیه برای پارامترهای غیرخطی

۲- اجرای الگوریتم LSE برای محاسبه بهترین جواب پارامترهای خطی

۳- اگر شرط توقف برآورده شد توقف آموزش

۴- اجرای یکبار تکرار آموزش بر پایه مشتق برای به‌روزرسانی پارامترهای غیرخطی

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که سرعت همگرایی پارامترها به مقادیر بهینه در روش آموزش

مختلط نسبت به روش آموزش گرادیان نزولی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است.

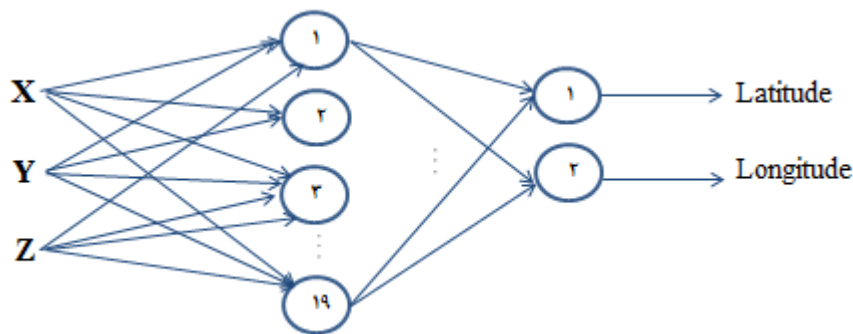
فصل ۴:

پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

۴-۱- مقدمه

در فصل قبل یک روش جهت تعیین موقعیت برون خط^۱ با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده میدان مغناطیسی زمین پیشنهاد شد. روش ارائه شده در این پژوهش که متکی بر یک نگاشت غیرخطی از اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنج می‌باشد، با استفاده از یک مدل شبکه عصبی پرسپترون از داده‌های میدان مغناطیسی زمین، عمل تعیین موقعیت را به صورت یکتا انجام می‌دهد.

سیستم تعیین موقعیت طراحی شده دارای یک لایه مخفی با تعداد نوزده نرون و یک لایه خروجی می‌باشد. این سیستم در ورودی سه مولفه X, Y, Z میدان مغناطیسی زمین را گرفته و طول و عرض جغرافیایی را به عنوان نتیجه سیستم تعیین موقعیت در خروجی خود می‌دهد. لازم به ذکر است که همه داده‌ها اعم از آموزشی و داده‌های تست قبل از اعمال به شبکه عصبی در بازه $[-1, 1]$ نرمالیزه شده‌اند. شکل (۴-۱) به وضوح نشان دهنده عملکرد این سیستم است.



شکل (۴-۱) سیستم تعیین موقعیت مغناطیسی

جهت انجام آزمایشات و ارزیابی سیستم تعیین موقعیت فوق، دو مسیر متفاوت در نظر گرفته شده است. یکی از این مسیرها با زاویه سمت ثابت پیموده شده است. در مسیر دوم به منظور بررسی تغییرات زاویه سمت بر الگوریتم، وسیله نقلیه این مسیر را با تغییرت پی‌درپی زاویه سمت پیموده است.

همچنین باید معیارهای بررسی کارایی سیستم مشخص گردد. این فصل ابتدا به معرفی این معیارها می‌پردازد و سپس در بخش انتهایی نتایج شبیه‌سازی برای سیستم تعیین موقعیت ذکر می‌گردد.

1 Off-line

۲-۴- معیار بررسی عملکرد سیستم

از معیارهای سنجش عملکرد جهت بررسی عملکرد سیستم استفاده شده است. در ادامه این معیارها تعریف شده اند.

۱- RMSE^۱: یکی از معیارهای ارزیابی سیستم تعیین موقعیت است و به صورت مجذور میانگین حاصل جمع مربعات خطا در هر مرحله تکرار آموزش شبکه عصبی مطابق رابطه (۱-۵) تعریف می-شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^p (\theta - \hat{\theta})^2}{p}} \quad (1-4)$$

در رابطه فوق θ داده آموزشی، $\hat{\theta}$ خروجی شبکه و p تعداد الگوهاست.

۲- RSSE^۲: یکی دیگر از معیارهای ارزیابی سیستم تعیین موقعیت است و به صورت مجذور حاصل جمع مربعات خطا در هر مرحله تکرار آموزش شبکه عصبی مطابق رابطه (۲-۴) تعریف می-شود.

$$RSSE = \sqrt{\sum_{n=1}^p (\theta - \hat{\theta})^2} \quad (2-4)$$

۳- maxE^۳: سومین معیار برای سنجش کارایی سیستم تعیین موقعیت است و به صورت بیشترین خطا در بین الگوها در هر مرحله تکرار آموزش مطابق رابطه (۳-۴) تعریف می-شود.

$$\max E = \max(\theta_i - \hat{\theta}_i) \text{ and } i = 1 \text{ to } p \quad (3-4)$$

۴- MAE^۴: چهارمین معیار برای سنجش سیستم تعیین موقعیت است و به صورت میانگین حاصل جمع قدرمطلق خطا در هر مرحله تکرار آموزش شبکه عصبی مطابق رابطه (۴-۴) تعریف می-شود.

2 Root Mean Square Error

3 Root Sum Square Error

4 Mean Absolute Error

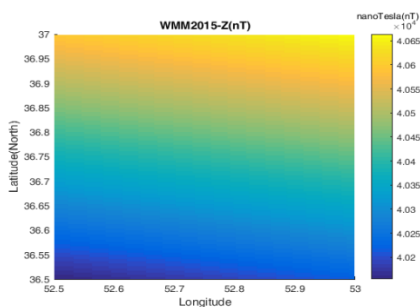
$$MAE = \frac{1}{p} \sum_{n=1}^p |\theta - \hat{\theta}| \quad (4-4)$$

۵- MSE: آخرین معیار برای سنجش سیستم تعیین موقعیت است و به صورت میانگین مربعات خطا در هر مرحله تکرار آموزش شبکه عصبی مطابق رابطه (۴-۵) تعریف می‌شود.

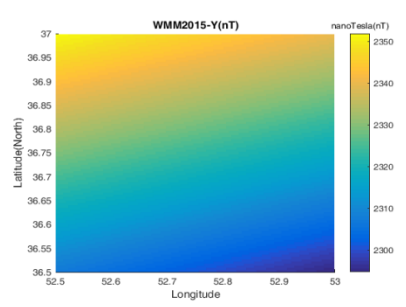
$$MSE = \frac{1}{p} \sum_{n=1}^p (\theta - \hat{\theta})^2 \quad (5-4)$$

۴-۳- نتایج سیستم تعیین موقعیت مبتنی بر مدل سازی عصبی

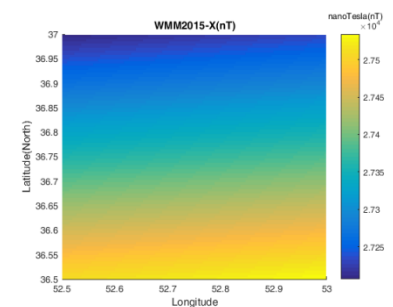
هدف از این بخش پیاده‌سازی روش ارائه شده در فصل سوم به منظور تعیین یکتای موقعیت می‌باشد. مدل سازی عصبی روند تغییرات مولفه‌های مستقل میدان مغناطیسی زمین یعنی X, Y, Z را با توجه به موقعیت جغرافیایی مدل سازی می‌کند. به عبارت دیگر مدل عصبی پرسپترون این مولفه‌ها را به یک فضای دو بعدی که شامل طول و عرض جغرافیایی می‌باشد نگاشت می‌کند. همچنین نقشه‌هایی که به منظور تعیین موقعیت با استفاده از این روش استفاده شده است، بر اساس فنون مدل سازی ایجاد شده است که به طور مفصل در فصل دوم به آن پرداخته شد. بدین منظور نقشه‌های مربوط به منطقه تست تهیه شده است. با توجه به نقشه‌ها روند تغییرات داده‌های میدان مغناطیسی زمین بدست آمده است. شکل‌های (۲-۴) الی (۴-۴) روند تغییرات مولفه‌های X, Y, Z میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست را نشان می‌دهند.



شکل (۴-۴) مولفه Z میدان مغناطیسی زمین



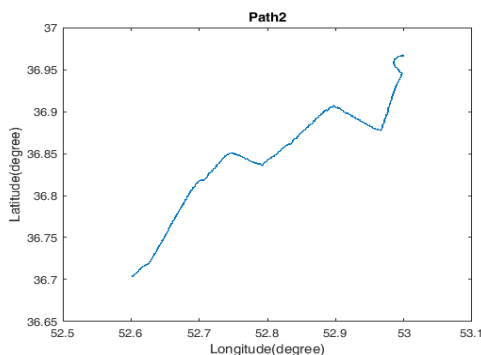
شکل (۳-۴) مولفه Y میدان مغناطیسی زمین



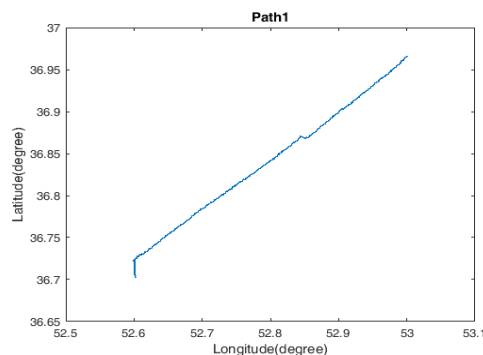
شکل (۲-۴) مولفه X میدان مغناطیسی زمین

۴-۳-۱- توصیف منطقه آزمون

با توجه به اینکه مدل‌سازی عصبی بر اساس یک پایگاه داده نیازمند یک الگوریتم مشخص برای استخراج ساختار شبکه می‌باشد و علاوه بر این با افزایش حجم اطلاعات، نیازمند صرف زمان بیشتر و امکانات سخت‌افزاری بالاتر است، یک منطقه با دو مسیر متفاوت انتخاب شده است. منطقه انتخاب شده در دریای خزر در نزدیکی سواحل شهرستان بابلسر با عرض جغرافیایی ۳۶.۵ الی ۳۷ درجه و طول جغرافیایی ۵۲.۵ الی ۵۳ درجه یک منطقه مربعی شکل با قطر بیش از ۷۰ کیلومتر می‌باشد. جهت بررسی دقت روش پیشنهادی تعیین موقعیت بر اساس نگاشت غیرخطی مولفه‌های میدان مغناطیسی به مختصات جغرافیایی متناظر با مولفه‌ها در منطقه مورد نظر، دو مسیر متفاوت در نظر گرفته شد. شکل‌های (۴-۵) و (۴-۶) مسیرهای شماره یک و دو را با استفاده از گیرنده GPS نشان می‌دهد.



شکل (۴-۶) مسیر شماره دو



شکل (۴-۵) مسیر شماره یک

۴-۳-۲- مدل‌سازی

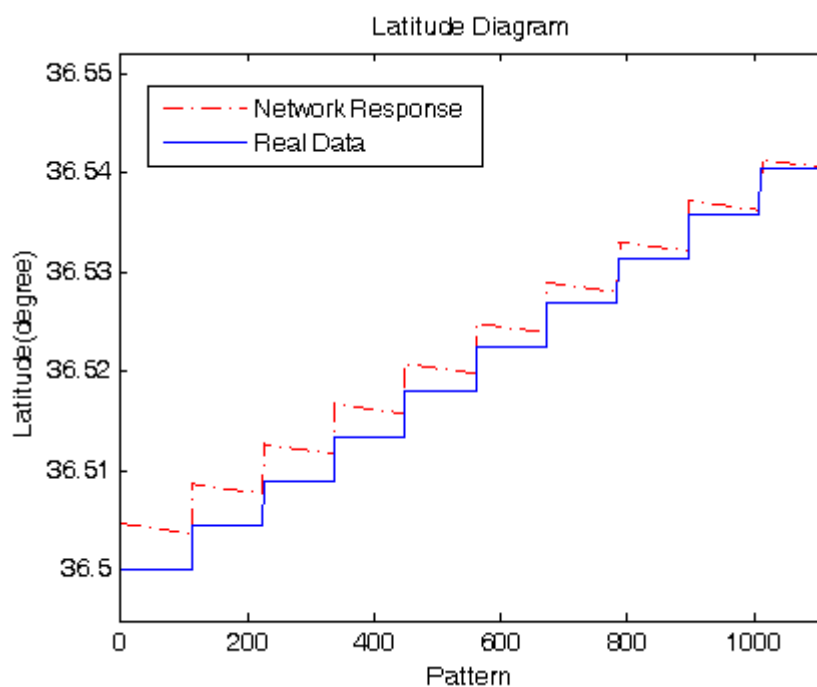
پس از ایجاد نقشه‌های بیان‌کننده روند تغییرات مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین، به منظور آموزش بهتر و همچنین ساده‌سازی سیستم از دو شبکه عصبی مجزا استفاده شد و نتایج مربوط به این دو شبکه پس از استخراج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شبکه اول مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین را به عرض جغرافیایی و شبکه دوم همان مولفه‌ها را به طول جغرافیایی نگاشت می‌کرد. در هر کدام از این شبکه‌ها از مجموعه داده‌های موجود ۷۰٪ به منظور آموزش شبکه عصبی پرسپترون بکار گرفته شده‌اند. در مرحله شناسایی ساختار در بهترین حالت ممکن تعداد نرون‌های لایه مخفی با استفاده از

الگوریتم تشریح شده در فصل سوم عدد نوزده استخراج شد. منظور از بهترین حالت ممکن کمترین میزان خطا به ازای تعداد نرون‌های استخراج شده است.

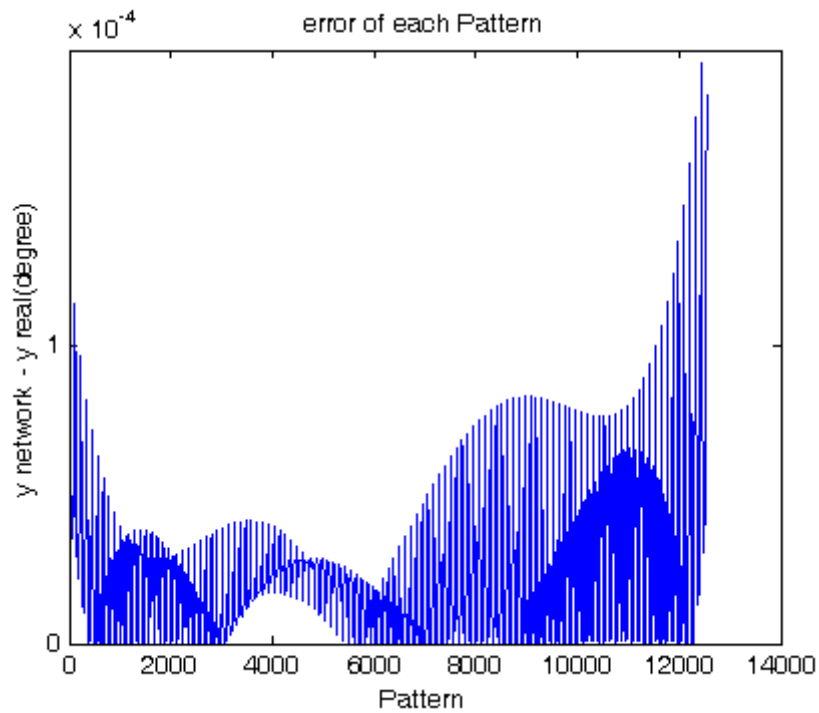
۴-۳-۱- نتایج سیستم تعیین موقعیت با استفاده از روش گرادیان نزولی

شکل (۷-۴) خروجی شبکه عصبی پرسپترون برای نگاشت مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین روی عرض جغرافیایی را با داده‌های آموزشی مقایسه می‌کند.

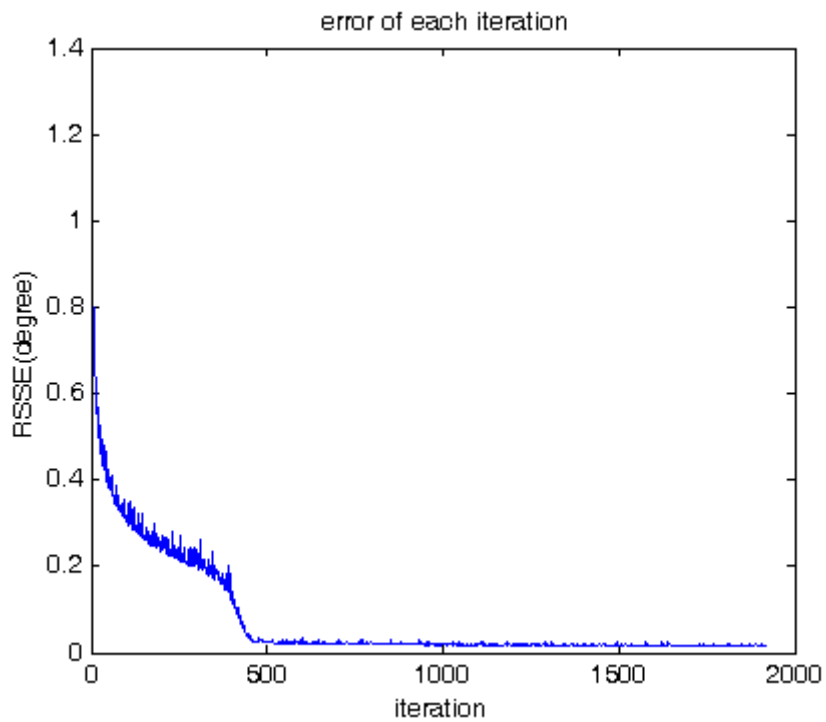
همچنین شکل (۸-۴) اندازه خطای هر الگوی آموزش دیده را نشان می‌دهد. حداکثر خطای شبکه در داده‌های آموزشی برابر با ۰.۰۰۰۱ می‌باشد. شکل (۹-۴) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای عرض جغرافیایی را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که مجذور حاصل جمع مربعات خطای الگوها پس از ۳۰۰۰ تکرار برابر با ۰.۰۱۱۸ می‌باشد.



شکل (۷-۴) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای عرض جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

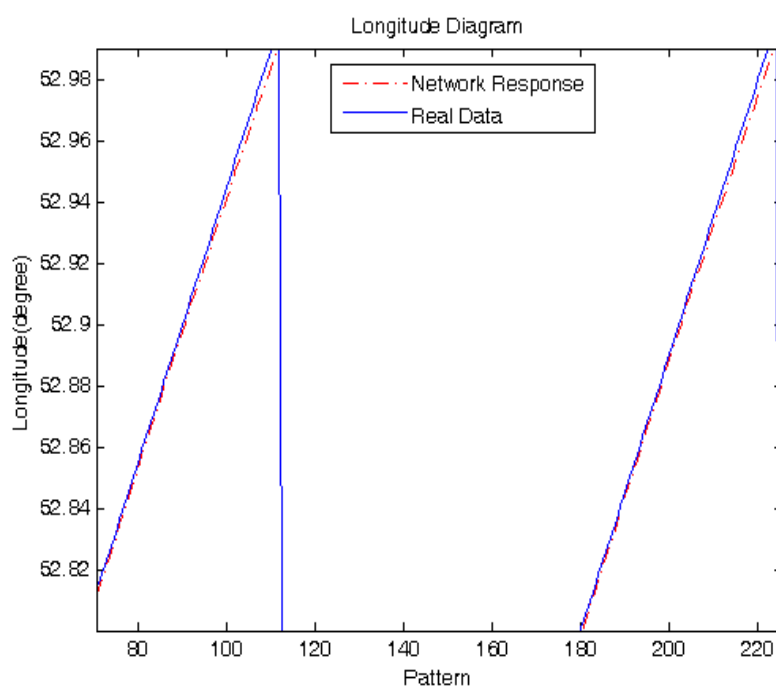


شکل (۸-۴) خطای آموزش به ازای هر الگو برای عرض جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

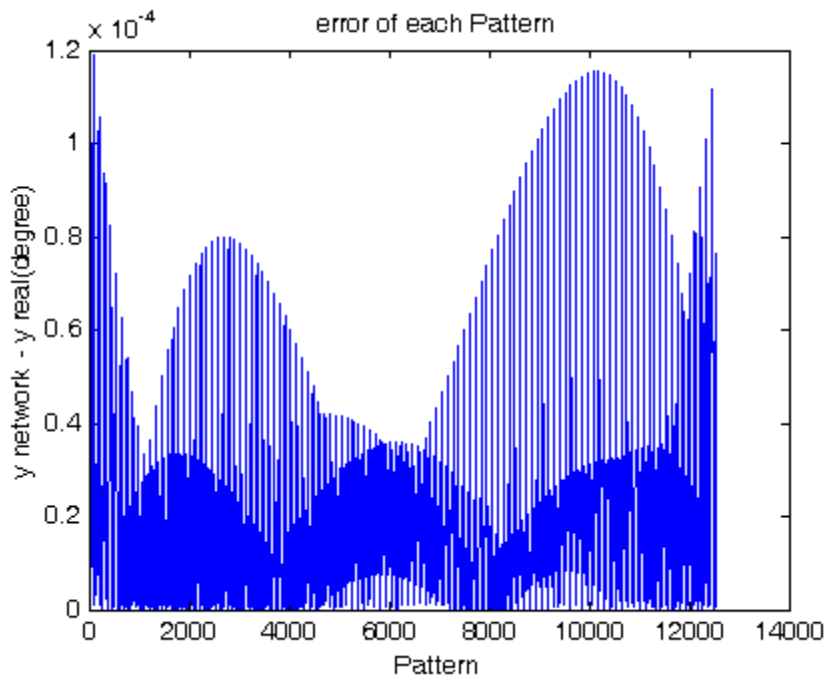


شکل (۹-۴) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای عرض جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

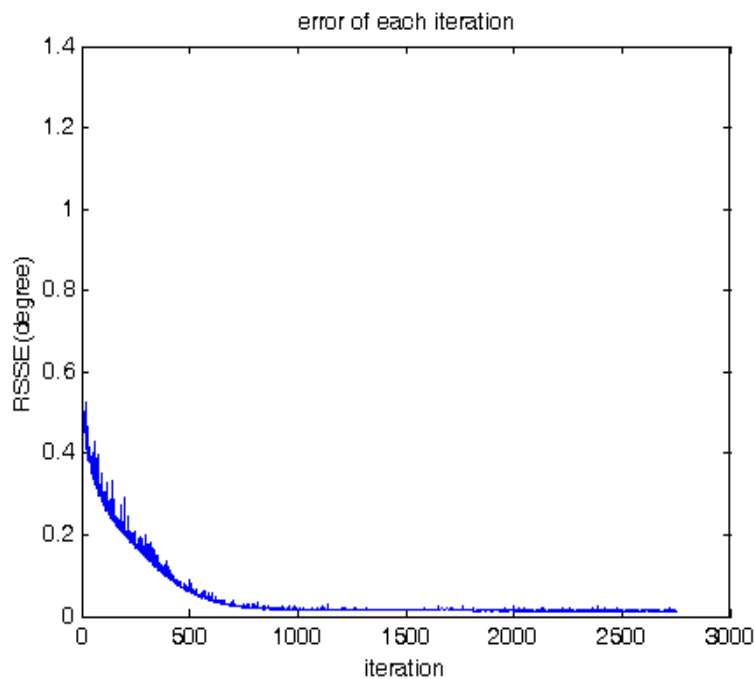
شکل (۴-۱۰) خروجی شبکه عصبی پرسپترون برای نگاشت مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین روی طول جغرافیایی را با داده‌های آموزشی مقایسه می‌کند. همچنین شکل (۴-۱۱) اندازه خطای هر الگوی آموزش دیده را نشان می‌دهد. حداکثر خطای شبکه در داده‌های آموزشی برابر با ۰.۰۰۰۱ می‌باشد. شکل (۴-۱۲) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای طول جغرافیایی را نشان می‌دهد. مجذور حاصل جمع مربعات خطای الگوها پس از ۳۰۰۰ تکرار برابر با ۰.۰۱۴۰ می‌باشد.



شکل (۴-۱۰) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای طول جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

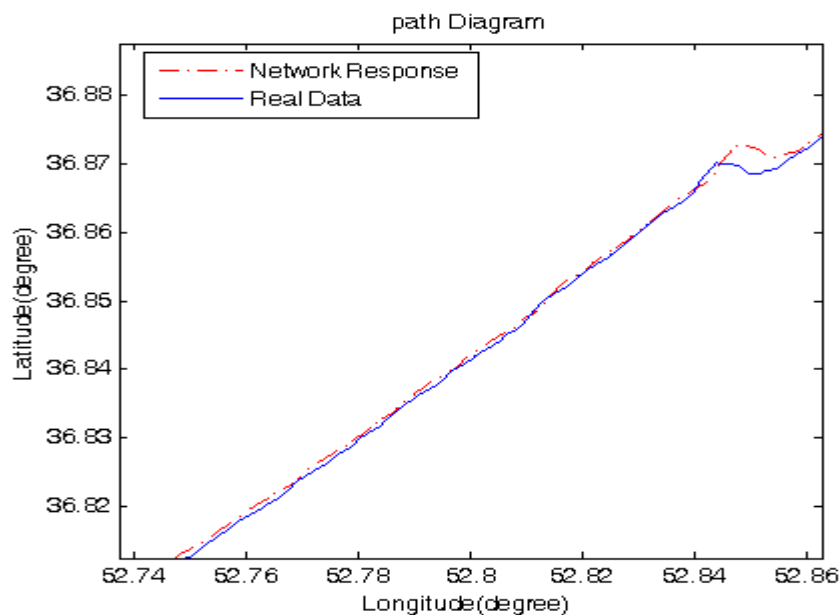


شکل (۴-۱۱) خطای آموزش به ازای هر الگو برای طول جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

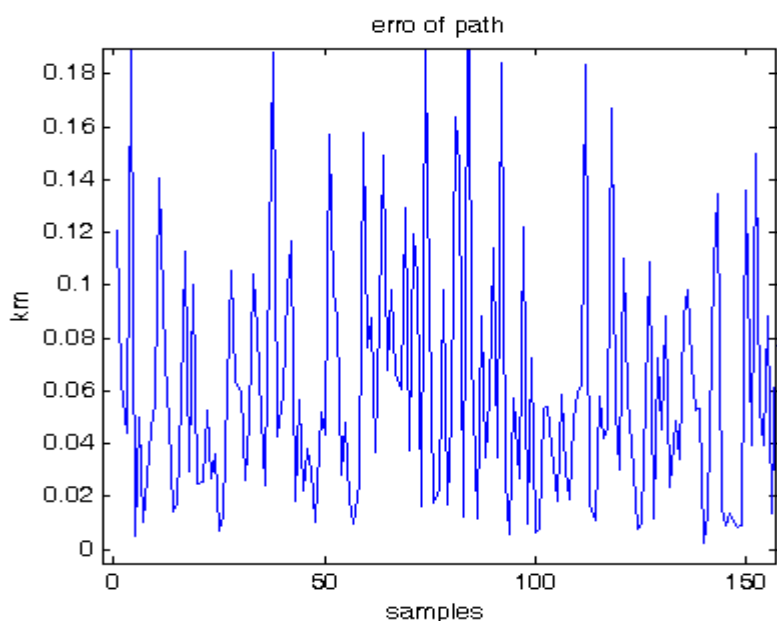


شکل (۴-۱۲) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای طول جغرافیایی با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

موقعیت تخمینی توسط سیستم برای مسیر شماره یک به همراه خطای هر نقطه از مسیر در شکل- های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) نشان داده شده است. متوسط اختلاف موقعیت بدست آمده با استفاده از سیستم طراحی شده از سامانه GPS برای مسیر شماره یک برابر با ۹۵.۷ متر می‌باشد.

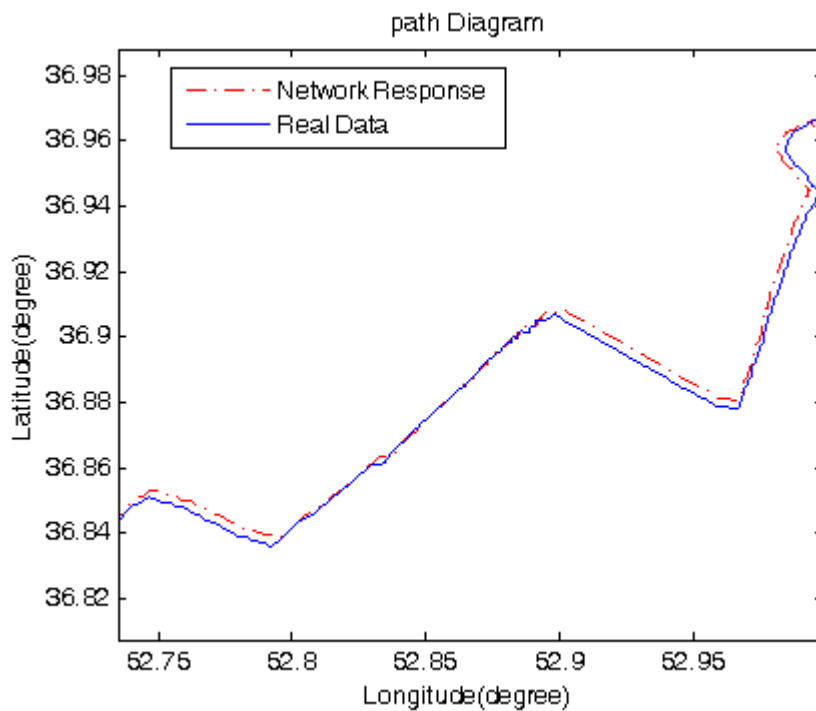


شکل (۴-۱۳) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

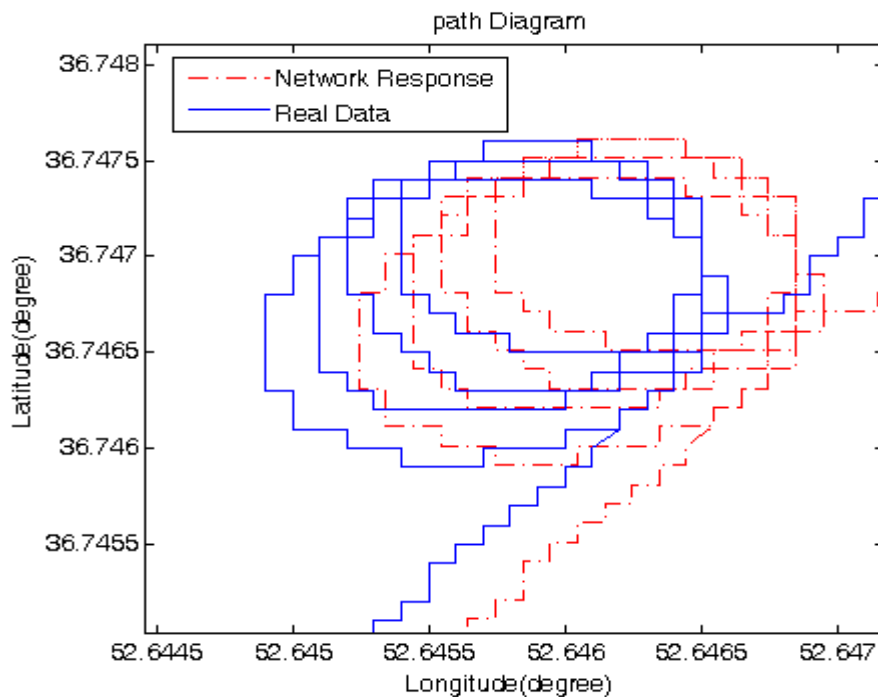


شکل (۴-۱۴) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

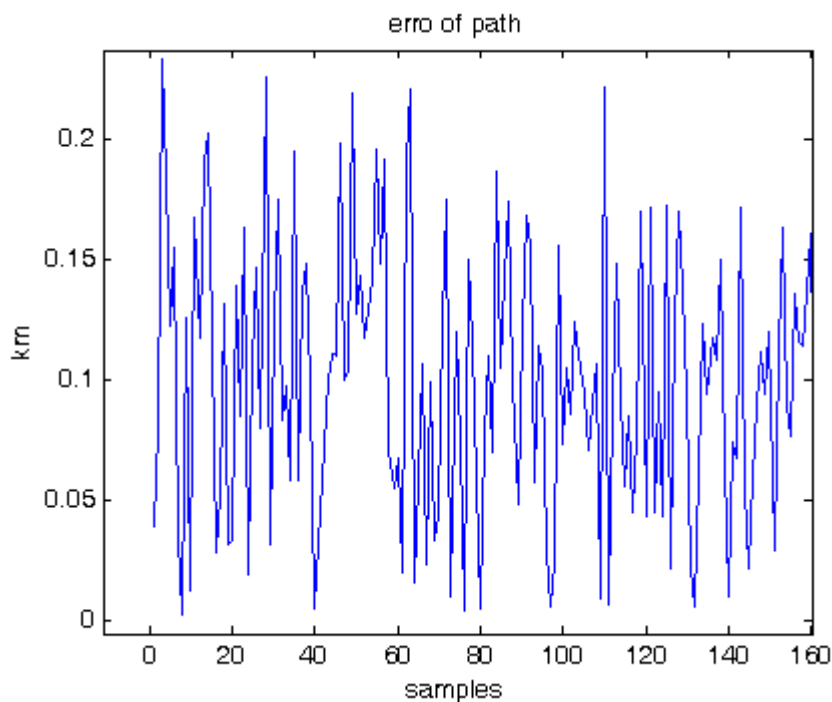
در ادامه موقعیت تخمینی توسط سیستم برای مسیر شماره دو و مسیر دایره‌ای شکل به همراه خطای هر نقطه از مسیر شماره دو در شکل‌های (۴-۱۵) تا (۴-۱۷) نشان داده شده است. متوسط اختلاف موقعیت بدست آمده با استفاده از سیستم طراحی شده از سامانه GPS برای مسیر شماره دو که مسیر دایره‌ای نیز جزئی از این مسیر است برابر با ۸۳.۸ متر می‌باشد. بنابراین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تغییر زاویه سمت تأثیری بر روی عملکرد سیستم تعیین موقعیت طراحی شده ندارد.



شکل (۴-۱۵) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی



شکل (۴-۱۶) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر دایره‌ای با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی



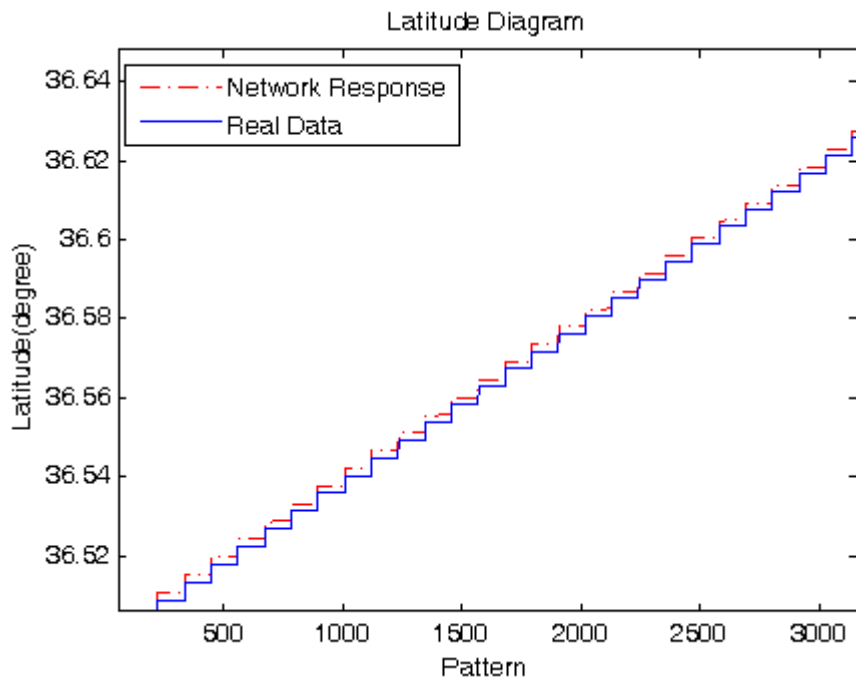
شکل (۴-۱۷) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم تعیین موقعیت با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون با روش آموزش گرادیان نزولی برای هر دو مسیر شماره یک و شماره دو از دقت خوبی برخوردار است. اختلاف خروجی این سیستم با GPS برای هر دو مسیر کمتر از ۱۰۰ متر می‌باشد.

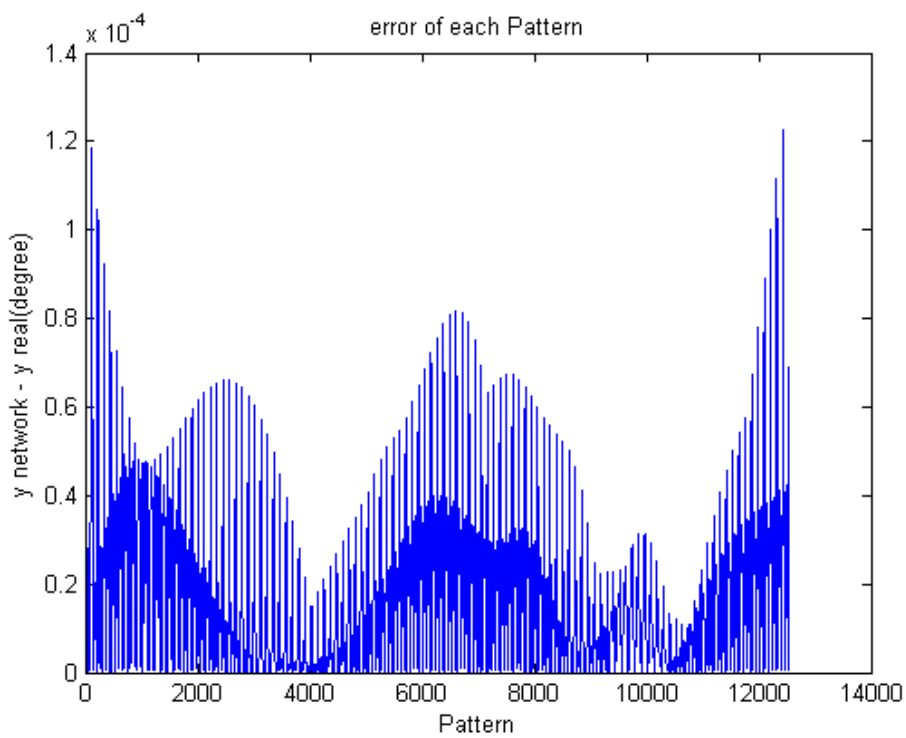
۴-۳-۲-۲- نتایج سیستم تعیین موقعیت با استفاده از روش آموزش مختلط

شکل (۴-۱۸) خروجی شبکه عصبی پرسپترون برای نگاشت مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین روی عرض جغرافیایی را با داده‌های آموزشی مقایسه می‌کند.

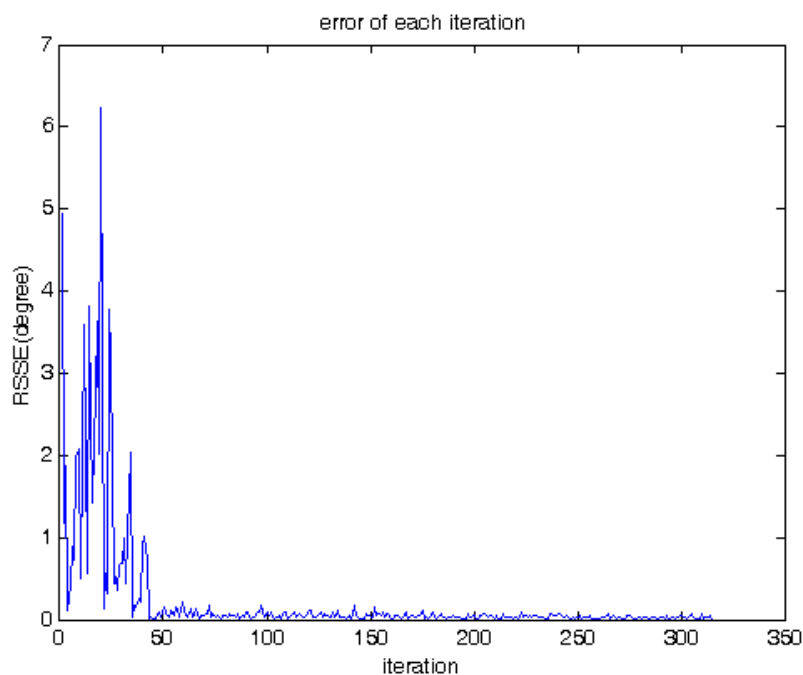
همچنین شکل (۴-۱۹) اندازه خطای هر الگوی آموزش دیده را نشان می‌دهد. حداکثر خطای شبکه در داده‌های آموزشی برابر با ۰.۰۰۰۱۲ می‌باشد. شکل (۴-۲۰) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای عرض جغرافیایی را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که مجذور حاصل جمع مربعات خطای الگوها پس از ۲۰۰۰ تکرار برابر با ۰.۰۱۰ می‌باشد.



شکل (۴-۱۸) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای عرض جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط

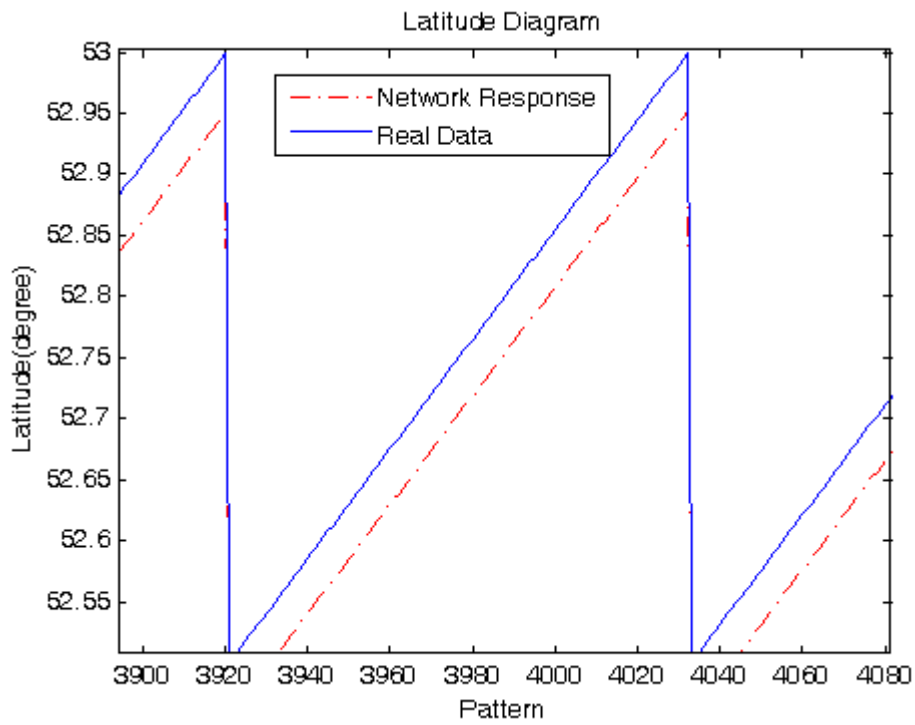


شکل (۴-۱۹) خطای آموزش به ازای هر الگو برای عرض جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط

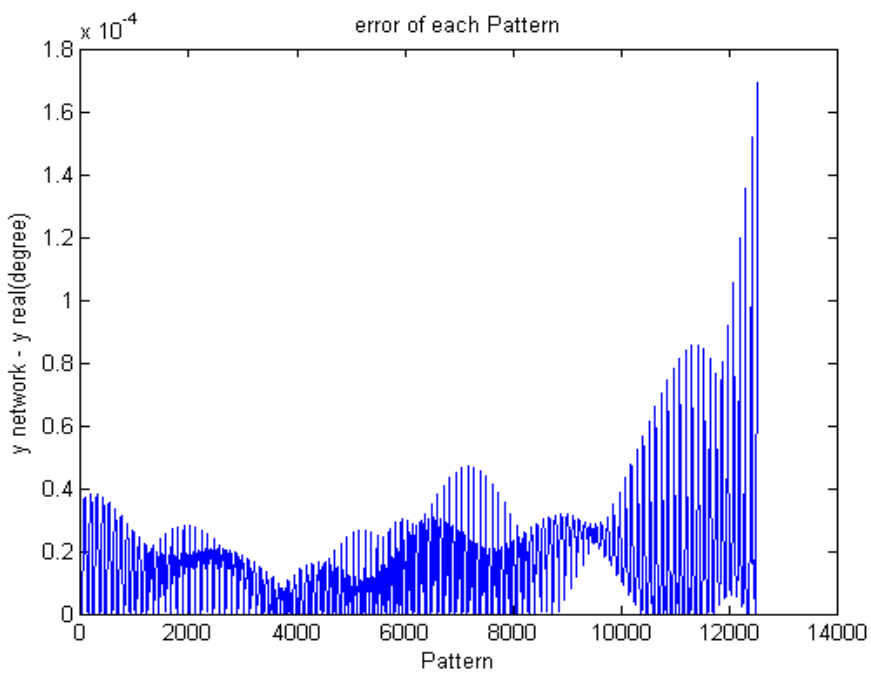


شکل (۴-۲۰) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای عرض جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط

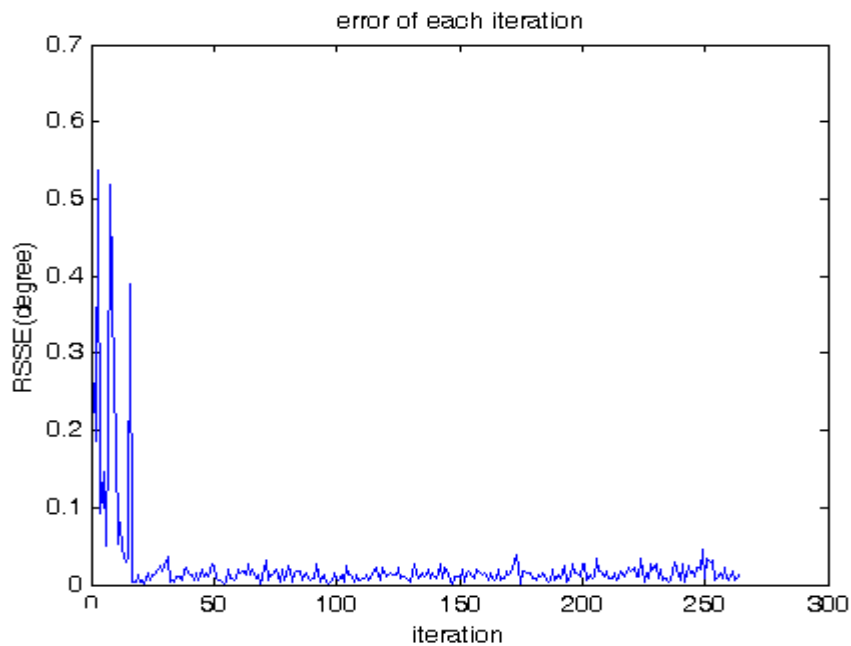
شکل (۴-۲۱) خروجی شبکه عصبی پرسپترون برای نگاشت مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین روی طول جغرافیایی را با داده‌های آموزشی مقایسه می‌کند. همچنین شکل (۴-۲۲) اندازه خطای هر الگوی آموزش دیده را نشان می‌دهد. حداکثر خطای شبکه در داده‌های آموزشی برابر با 0.00018 می‌باشد. شکل (۴-۲۳) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای طول جغرافیایی را نشان می‌دهد. مجذور حاصل جمع مربعات خطای الگوها پس از ۱۶۰۰ تکرار برابر با 0.011 می‌باشد.



شکل (۴-۲۱) مقایسه خروجی شبکه عصبی با داده‌های آموزشی برای طول جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط

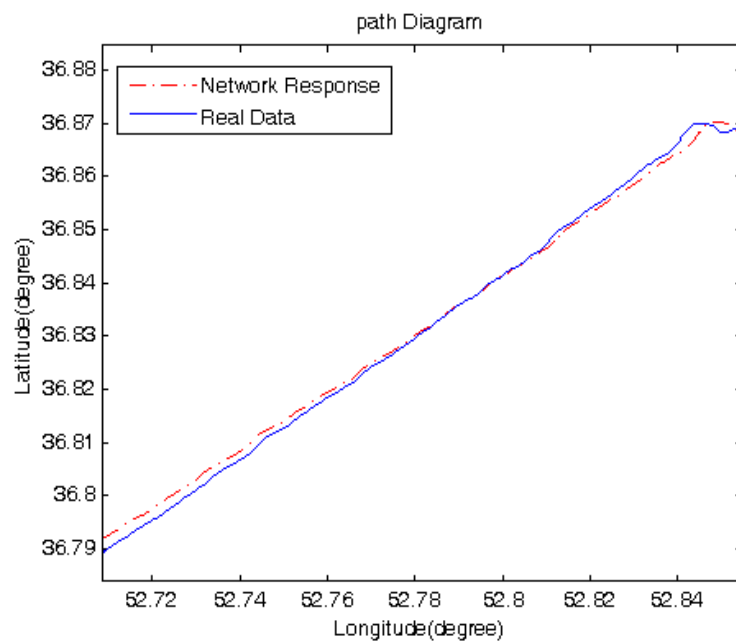


شکل (۴-۲۲) خطای آموزش به ازای هر الگو برای طول جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط

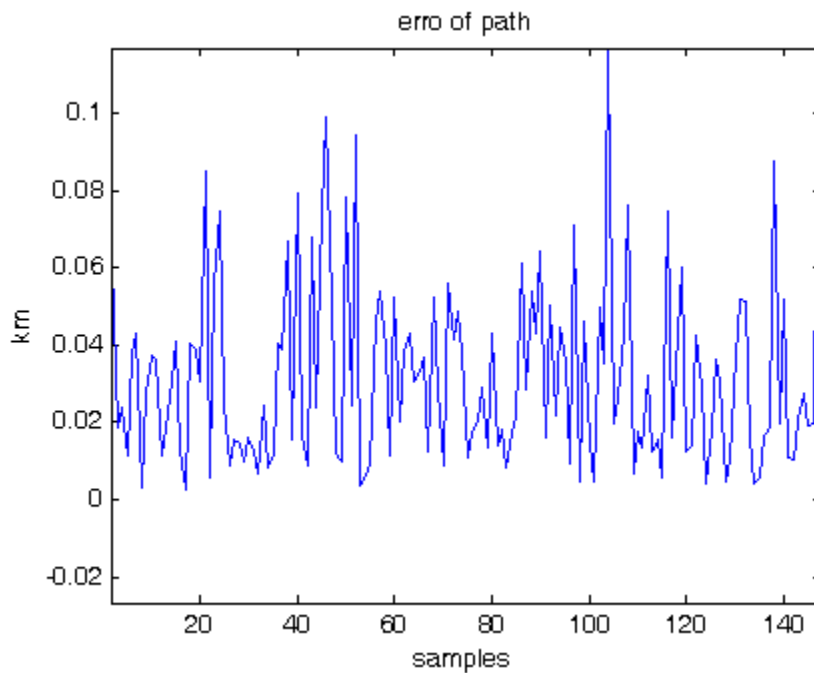


شکل (۴-۲۳) معیار RSSE سیستم تعیین موقعیت در الگوریتم آموزش شبکه عصبی برای طول جغرافیایی با استفاده از روش آموزش مختلط

موقعیت تخمینی توسط سیستم برای مسیر شماره یک به همراه خطای هر نقطه از مسیر در شکل-های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) نشان داده شده است. متوسط اختلاف موقعیت بدست آمده با استفاده از سیستم طراحی شده از سامانه GPS برای مسیر شماره یک برابر با ۸۸.۶ متر می‌باشد.

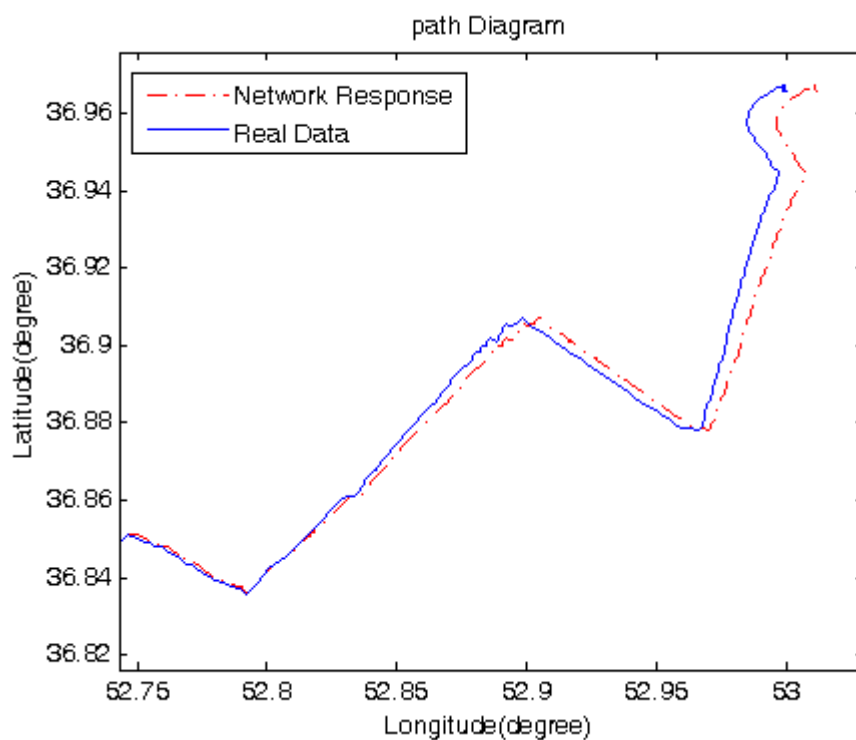


شکل (۴-۲۴) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از روش آموزش مختلط

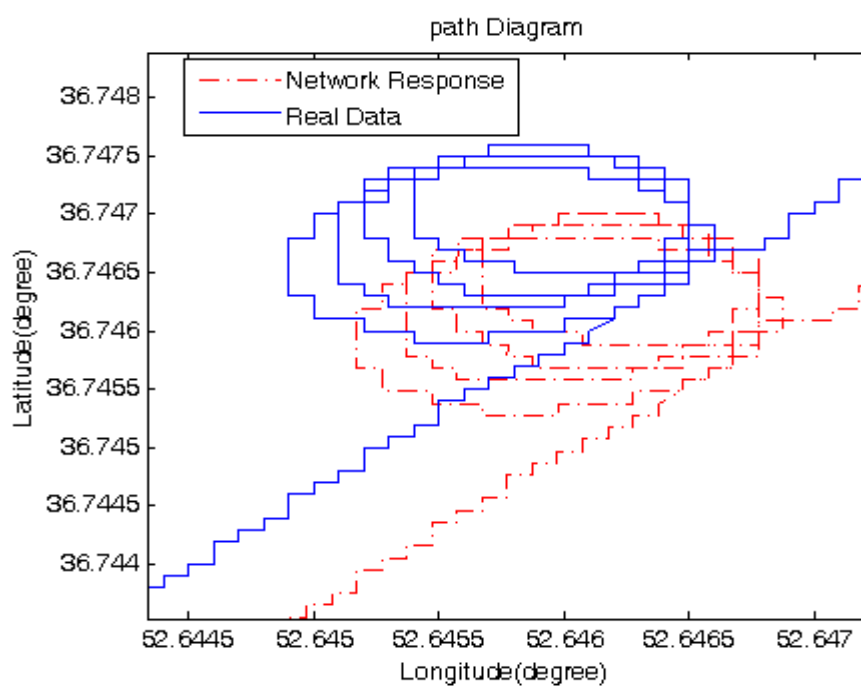


شکل (۴-۲۵) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره یک با استفاده از روش آموزش مختلط

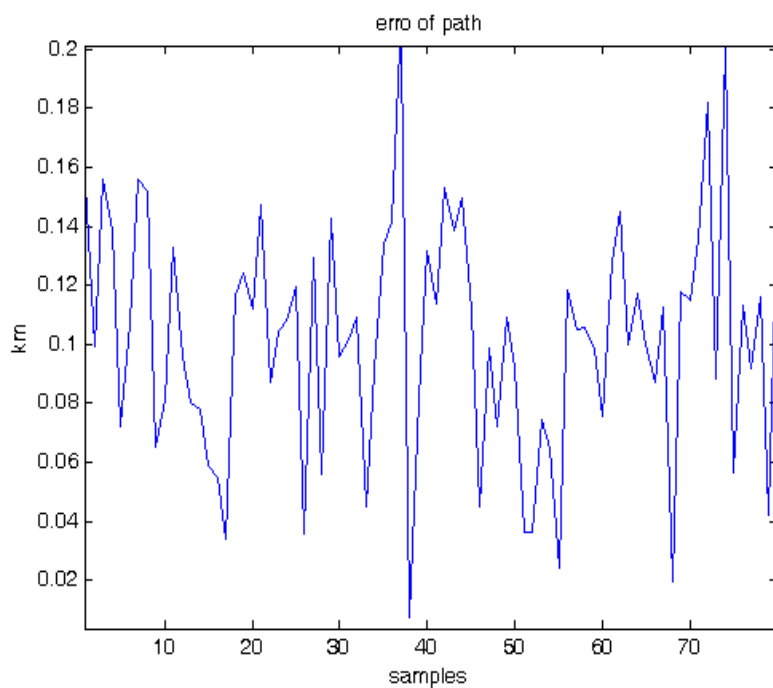
در ادامه موقعیت تخمینی توسط سیستم برای مسیر شماره دو و مسیر دایره‌ای شکل به همراه خطای هر نقطه از مسیر شماره دو در شکل‌های (۴-۲۶) تا (۴-۲۸) نشان داده شده است. متوسط اختلاف موقعیت بدست آمده با استفاده از سیستم طراحی شده از سامانه GPS برای مسیر شماره دو برابر با ۷۶.۳ متر می‌باشد.



شکل (۴-۲۶) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از روش آموزش مختلط



شکل (۴-۲۷) مقایسه موقعیت تخمینی توسط سیستم با موقعیت بدست آمده از طریق GPS برای مسیر دایره‌ای با استفاده از روش آموزش مختلط



شکل (۴-۲۸) اختلاف موقعیت تخمینی سیستم و GPS برای مسیر شماره دو با استفاده از روش آموزش مختلط نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم تعیین موقعیت با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون برای هر دو مسیر شماره یک و شماره دو از دقت خوبی برخوردار است. اختلاف خروجی این سیستم با GPS برای هر دو مسیر کمتر از ۱۰۰ متر می‌باشد.

فصل ۵:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه یک روش جدید جهت تعیین موقعیت برون‌خط با استفاده از اطلاعات میدان مغناطیسی زمین ارائه گردید. در این پژوهش ابتدا داده‌های مستقل و وابسته میدان مغناطیسی زمین در محدوده میدان تست تولید شد. منطقه تست یک ناحیه مربعی شکل در دریای خزر با عرض جغرافیایی ۳۶.۵ الی ۳۷ درجه و طول جغرافیایی ۵۲.۵ الی ۵۳ درجه می‌باشد. قطر منطقه مذکور بیش از ۷۰ کیلومتر می‌باشد. در روش ارائه شده تنها از مولفه‌های مستقل میدان مغناطیسی زمین یعنی Y, X, Z استفاده شده است. در این روش پیشنهادی با استفاده از یک مدل عصبی پرسپترون از تغییرات میدان مغناطیسی زمین، تعیین موقعیت به صورت یکتا انجام شد. در واقع این شبکه مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین را به طول و عرض جغرافیایی نگاشت می‌کند. در این روش پس از استخراج ساختار شبکه با استفاده از یک الگوریتم اتوماتیک، از روش پس‌انتشار خطای باسرپرست و الگوریتم SD و روش آموزش مختلط جهت آموزش شبکه استفاده شده است. سپس مولفه‌های مغناطیسی مربوط به دو مسیر متفاوت به شبکه اعمال شده و خروجی طول و عرض جغرافیایی حاصل شده از شبکه با خروجی GPS مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که سرعت همگرایی پارامترها به مقادیر بهینه در روش آموزش مختلط نسبت به روش آموزش گرادیان نزولی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است.

نتایج ارائه شده در فصل چهارم نشان از عملکرد خوب سیستم تعیین موقعیت دارد. با سیستم ایجاد شده توانستیم عمل تعیین موقعیت را با دقت تقریبی ۱۰۰ متر متوسط نسبت به GPS انجام دهیم. نتایج ارائه شده نشان داد که دقت روش پیشنهادی هیچ وابستگی به تغییرات زاویه سمت ندارد. همچنین از مقاومت نسبی خوبی نسبت به نویز احتمالی مغناطیس‌سنج برخوردار است

۵-۲- پیشنهادات

۱- به دلیل محدودیت‌های موجود در این پایان‌نامه از داده‌های شبیه‌سازی شده بجای داده‌های مغناطیس‌سنج استفاده شد. در صورت تامین منابع مالی در کارهای آتی می‌توان از داده‌های حقیقی سنسورهای مغناطیس‌سنج استفاده کرد. در صورت استفاده از داده‌های حقیقی، این داده‌ها باید با استفاده از روش‌های کالیبراسیون کالیبره شوند.

- ۲- در این پژوهش یک سیستم تعیین موقعیت برون خط با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی زمین ارائه گردید. در کارهای آتی می‌توان این سیستم را به یک سیستم برخط ارتقا داد.
- ۳- در این تحقیق به منظور تنظیم پارامترهای شبکه از یک روش پس انتشار خطای باسرپرست و الگوریتم SD جهت آموزش شبکه استفاده شده است. در کارهای آتی می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های جدید بر کارایی شبکه افزود.
- ۴- سیستم‌های ناوبری الگومحور که سیستم ناوبری مغناطیسی نیز در این دسته جای می‌گیرد معمولاً به عنوان مجموعه سیستم‌های کمک‌ناوبری برای سامانه‌های اینرسی استفاده می‌شوند. در کارهای آتی می‌توان این سیستم را با یک سیستم ناوبری اینرسی به منظور افزایش دقت آن تلفیق کرد.

مراجع

۱. طلوعی، ع.، م.ه.ملایی و م.تبوخت، ناوبری با استفاده از تطبیق پایگاه داده‌های عوارض زمین. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی انرژی و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هوافضا، کارگروه هدایت و ناوبری، ۱۳۹۴.
۲. نوبهاری، ه. و ع.شریفی، مقدمه‌ای بر هدایت وسایل پرنده. دانشکده مهندسی هوافضا، هسته پژوهشی هدایت و کنترل دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۹۱.
۳. Putman, N.F., et al., *An inherited magnetic map guides ocean navigation in juvenile Pacific salmon*. Current Biology, 2014. **24**(4): p. 446-450.
۴. Thébault, E., et al. *The magnetic field of the Earth's lithosphere*. Space Science Reviews, 2010. **155**(1-4): p. 95-127.
۵. Li, J., et al., *Magnetic interferential field compensation in geomagnetic measurement*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2014. **3** (۲): p. 244-251.
۶. Pang, H., et al., *Calibration of three-axis fluxgate magnetometers with nonlinear least square method*. Measurement, 2013. **46**(4): p. 1600-1606.
۷. Renaudin, V., M.H. Afzal, and G. Lachapelle. *New method for magnetometers based orientation estimation*. in *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2010 IEEE/ION*. 2010. IEEE.
۸. Wu, Z., et al., *Attitude-independent magnetometer calibration for marine magnetic surveys: regularization issue*. Journal of Geophysics and Engineering, 2010. **10** (۴): p. 045002.
۹. Pang, H., et al., *A new calibration method of three axis magnetometer with nonlinearity suppression*. IEEE Transactions on Magnetics, 2013. **49**(9): p. 5011-5015.
۱۰. Wu, Z., et al., *Constrained total least-squares calibration of three-axis magnetometer for vehicular applications*. Measurement Science and Technology, 2013. **24**(9): p. 095003.
۱۱. Pang, H., et al., *Improvement of magnetometer calibration using Levenberg–Marquardt algorithm*. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2014. **9**(3): p. 324-328.
۱۲. Pang, H., et al. *Calibration of three-axis magnetometer diversionary error based on equipment and LMS adaptive algorithm*. in *Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation*. ۲۰۱۰. International Society for Optics and Photonics.

۱۳. Wu, Z., et al., *Calibration of three-axis magnetometer using stretching particle swarm optimization algorithm*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013. **62**(2): p. 281-292.
۱۴. Pang, H., et al., *Calibration of three-axis magnetometers with differential evolution algorithm*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013. **346**: p. 5-10.
۱۵. Guo, C., et al. *Algorithm for geomagnetic navigation and its validity evaluation*. in *Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011 IEEE International Conference on*. 2011. IEEE.
۱۶. Schmucker, *External part of the earth's magnetic field*. 1985. **859**: p. 67-92.
۱۷. بلندی.ج، م.رضایان و ف.ف.صابری، مقایسه انواع روش های مدل سازی میدان مغناطیسی زمین در مدارات پایین. هشتمین کنفرانس سالانه بین المللی انجمن هوافضای ایران، دانشگاه مالک اشتر شاهین شهر ۱۳۸۷.
۱۸. Vichare, G. and R. Rajaram, *Comparative study of models of Earth's magnetic field derived from Oersted, CHAMP and SAC-C Magnetic Satellite Data*. Journal of Indian Geophysical Union, 2009. **13**: p. 33-42.
۱۹. Chulliat, A., et al., *The us/uk world magnetic model for 2015-2020*. 2015.
۲۰. Hapgood, M., *Space physics coordinate transformations: A user guide*. Planetary and Space Science, 1992. **40**(5): p. 711-717.
۲۱. Jacobs, J.A., *Geomagnetism*. Academic Press, 1987: p. 249-512.
۲۲. Manoj, C., et al., *Evidence for short spatial correlation lengths of the noontime equatorial electrojet inferred from a comparison of satellite and ground magnetic data*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2006. **111**(A11).
۲۳. ویسی.ه.و.، مفاخری.ک و باقری شورکی.س، مبانی شبکه های عصبی (چاپ چهارم). انتشارات نص، ۱۳۹۵.
۲۴. Jang, J.-S.R., C.-T. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-fuzzy and soft computing, a computational approach to learning and machine intelligence*. 1997.
۲۵. Haykin, S.S., et al., *Neural networks and learning machines*. Vol. 3. 2009: Pearson Upper Saddle River, NJ, USA.:

Abstract:

The purpose of this thesis is offline positioning of a moving body on the ground using the Earth's magnetic field components. For this purpose, by using WMM2015 Earth's magnetic field model, data of Earth's magnetic field is generated, then established a multilayer perceptron neural network and by using changing process of Earth's magnetic field and adjust the parameters of neural network by using the method of supervised learning back propagation error and by using two different steepest descent and hybrid learning algorithms the positioning system has been constructed. simulation results show that the speed of convergence network adjustable parameters to optimal values in the hybrid learning algorithm is more than steepest descent algorithm. positioning system established by using multilayer perceptron have suitable accuracy and robustness and can be positioned with an accuracy of about 100 meter average.

Keywords: Neural Network, Earth Magnetic Field, Positioning, Steepest Descent, Hybrid Learning



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Control Engineering

Positioning Based on Earth Magnetic Field Using Neural Networks

By: saeed parvari yamchi

**Supervisor:
Dr. Ali Akbarzadeh Kalat**

**Adviser:
Kaveh kianfar**

February 2017